

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**БР.АКП -42.00.00.000 ПЗ**

**група АКП -23-1К**

**Станіслав Дмитрів**

**2025**

**Міністерство освіти і науки України**  
**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
**Факультет автоматизації та енергетики**  
**Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій**

Дмитрів Станіслав Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53  
(індекс)

## **БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

Розробка системи автоматизованого керування установкою стабілізації нафти  
(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

### **Нормоконтроль**

доцент О.В. Кучмистенко  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### **Рецензент**

доцент І.І. Чигур  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### **Здобувач освітнього ступеня**

АКП-23-1К С.Р. Дмитрів  
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### **Науковий керівник**

доцент О.В. Кучмистенко  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

### **Допущено до захисту** **Завідувач кафедри**

доцент А.І. Лагойда  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 - «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКТ**

А.І. Лагойда.

«   »                      20     року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Дмитриву Станіславу Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи автоматизованого керування установкою стабілізації нафти

керівник роботи Кучмистенко Олександр Васильович к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «  07  »    травня    20     року №     /    

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики, методичні вказівки, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу стабілізації нафти, як об'єкта автоматизації

2. Ідентифікація об'єкта керування та синтез системи автоматизованого регулювання

3. Синтез системи автоматичного керування температурним режимом ребойлера колони стабілізації нафти в matlab simulink

4. Розробка проектних рішень для асу процесу стабілізації нафти

5 Загальні висновки. Перелік посилань на джерела.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Лист 1 – Технологічна схема установки стабілізації нафти– БР.АКП – 42.00.00.000 01;

Лист 2 – Синтез САК температурним режимом ребойлера колони стабілізації нафти в MATLAB Simulink– БР.АКП –42.00.00.000 02;

Лист 3 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКП – 42.00.00.000 03;

Лист 4 – Схема зовнішніх з'єднань – БР.АКП – 42.00.00.000 04;

Лист 5 – Схема шита АСК – БР.АКП – 42.00.00.000 05.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу стабілізації нафти, як об'єкта автоматизації	13.05.2025 р.	
2	Ідентифікація об'єкта керування та синтез системи автоматизованого регулювання	18.05.2025 р.	
3	Синтез системи автоматичного керування температурним режимом ребойлера колони стабілізації нафти в matlab simulink	23.05.2025 р.	
4	Розробка проектних рішень для АСУ процесу стабілізації нафти	29.05.2025 р.	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

С.Р. Дмитрів \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

О.В. Кучмистенко \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 60 сторінок друкованого тексту, 11 рисунків, 7 посилань на джерела.

Тема: «Розробка системи автоматизованого керування установкою стабілізації нафти»

Об'єкт дослідження: процес стабілізації нафти на основі ректифікаційного поділу в умовах промислової установки.

Мета роботи: створення проектних рішень щодо автоматизованої системи керування технологічним процесом стабілізації нафти з урахуванням динамічних характеристик об'єкта керування.

Методи дослідження: аналітичне моделювання процесу теплообміну у ребойлері стабілізаційної колони, розрахунок динамічних параметрів моделі, методи лінеаризації та частотного аналізу, синтез регуляторів методами Зіглера–Ніколса та симетричного оптимуму, побудова імітаційної моделі в MATLAB Simulink.

Результати бакалаврської роботи: у межах роботи здійснено аналіз фізико-хімічних основ процесу стабілізації, побудовано структурну схему автоматизації установки, розроблено математичну модель контуру регулювання температури ребойлера, визначено її динамічні параметри та передавальну функцію. В результаті моделювання в середовищі MATLAB Simulink обґрунтовано доцільність обраної структури керування, а також забезпечено налаштування регуляторів для підвищення точності підтримання температурного режиму. У роботі проведено технічний аналіз та обґрунтування вибору апаратного забезпечення системи, розроблено електричні схеми підключень та побудовано функціональну схему автоматизації, що забезпечує надійну роботу системи стабілізації нафти в промислових умовах.

Ключові слова: стабілізація нафти, автоматизована система керування, математичне моделювання, ректифікаційна колона, регулятор температури.

## ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 60 pages of printed text, 11 figures, and 7 references.

Topic: "Development of an Automated Control System for the Oil Stabilization Unit"

Object of study: the process of oil stabilization based on rectification under industrial operating conditions.

Purpose of the work: to develop project solutions for an automated control system of the oil stabilization process, taking into account the dynamic characteristics of the control object.

Research methods: analytical modeling of heat exchange in the reboiler of the stabilization column, calculation of the model's dynamic parameters, linearization techniques and frequency-domain analysis, synthesis of regulators using the Ziegler–Nichols method and the symmetric optimum method, simulation modeling in MATLAB Simulink.

Results of the bachelor's thesis: the work includes an analysis of the physico-chemical principles of the stabilization process, development of a structural automation scheme for the unit, and creation of a mathematical model for the temperature control loop of the reboiler with determination of its dynamic parameters and transfer function. Based on the simulation in MATLAB Simulink, the efficiency of the chosen control structure is justified, and the regulators are tuned to ensure accurate temperature regulation. The thesis also includes a technical analysis and justification of the selected hardware components, development of electrical connection diagrams, and construction of the functional automation scheme, ensuring reliable operation of the oil stabilization system under industrial conditions.

Keywords: oil stabilization, automated control system, mathematical modeling, rectification column, temperature regulator.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАФТИ, ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Стабілізація нафти .....	11
1.2 Функціональна схема АСУ ТП установки стабілізації нафти.....	13
1.3 Логіка керування АСУ процесу стабілізації нафти .....	16
1.4 Хімізм процесу стабілізації нафти .....	19
Висновки до розділу .....	20
<b>2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....</b>	<b>22</b>
2.1 Опис процесу стабілізації нафти та ідентифікація об’єкту керування .....	22
2.2 Отримання математичної моделі обраного об’єкту керування.....	25
Висновки до розділу .....	29
<b>3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ РЕБОЙЛЕРА КОЛОНИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАФТИ В MATLAB SIMULINK.....</b>	<b>30</b>
3.1 Теоретичні основи синтезу системи керування .....	30
3.2 Аналіз передавальної функції об’єкту керування.....	30
3.3 Методологія синтезу ПІД-регулятора .....	31
3.4 Концептуальна схема реалізації в MATLAB Simulink .....	32
3.5 Комплексний аналіз стійкості та якості керування .....	34
3.6 Стратегії компенсації збурень та підвищення ефективності керування .....	36
3.7 Практичні аспекти впровадження та експлуатації.....	37
3.8 Аналіз стійкості та якості керування системи температурного режиму ребойлера .....	38
Висновки до розділу .....	42

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка системи автоматизованого керування установкою стабілізації нафти			Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Дмитрів С.Р.						Д	6	
Перевір.		Кучмистенко О.В.								
Реценз.		Чигур І.І.								
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						АКП-23-1К, ІФНТУНГ		
Затверд.		Лагойда А.І.								

<b>4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АСУ ПРОЦЕСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАФТИ .....</b>	<b>43</b>
4.1 Аналіз об'єкта керування та постановка задачі для розроблення проєктної документації .....	43
4.2 Вибір давачів та первинних перетворювачів .....	44
4.3 Проектна документація .....	54
Висновки до розділу .....	56
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>57</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА .....</b>	<b>60</b>

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система управління;

САК – система автоматизованого керування;

SCADA – система диспетчерського контролю та збору даних (Supervisory Control and Data Acquisition);

PID – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор;

t – температура, °C;

p – тиск, МПа;

G – витрата, кг/год або м<sup>3</sup>/год;

Δp – перепад тиску, Па;

T – час, с;

τ – стала часу, с;

K – коефіцієнт підсилення системи;

Simulink – середовище моделювання, що є частиною MATLAB;

MATLAB – програмне середовище технічних обчислень;

FE – витратомір (Flow Element);

TE – термодатчик (Temperature Element);

LE – рівнемір (Level Element).

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

На тлі зростаючих потреб у підвищенні ефективності нафтопереробних процесів особливої уваги набуває удосконалення технологій керування критично важливими установками, зокрема установками стабілізації нафти. Цей процес є фундаментальним етапом підготовки нафти до подальшого транспортування і переробки, оскільки забезпечує вилучення легких фракцій, стабілізацію тиску насичених парів та покращення фізико-хімічних властивостей кінцевого продукту.

Оскільки стабілізація передбачає складні термодинамічні перетворення, що супроводжуються багатофакторною взаємодією змінних параметрів, виникає необхідність у точному й динамічному регулюванні цих процесів. Традиційні методи керування, що ґрунтуються на ручному втручанні або примітивних логічних алгоритмах, уже не задовольняють вимоги до стабільності, оперативності та адаптивності. Це зумовлює потребу у впровадженні систем автоматизованого керування (САК), які забезпечують безперервний моніторинг, адаптивну реакцію на збурення та підтримку параметрів у межах технологічно допустимих значень.

У межах цієї бакалаврської роботи здійснюється комплексна розробка системи автоматизованого керування установкою стабілізації нафти, яка має враховувати нелінійність об'єкта, вплив внутрішніх і зовнішніх збурень, а також забезпечувати високу точність регулювання температури, тиску та витрати. Особливу увагу приділено математичному моделюванню об'єкта керування, вибору адекватної структури регуляторів, а також реалізації моделі у середовищі динамічної симуляції.

Актуальність дослідження зумовлена потребою промислових підприємств у надійних та гнучких САК, здатних забезпечувати оптимальний режим роботи технологічного обладнання за умов змін навантаження, коливань вхідних параметрів та інших непередбачуваних впливів.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Таким чином, робота спрямована на реалізацію інженерного рішення, що поєднує аналіз динаміки об'єкта, синтез системи регулювання та її валідацію в умовах наближених до реального технологічного середовища, що дозволяє підвищити ефективність і безпечність функціонування нафтохімічного виробництва.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАФТИ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

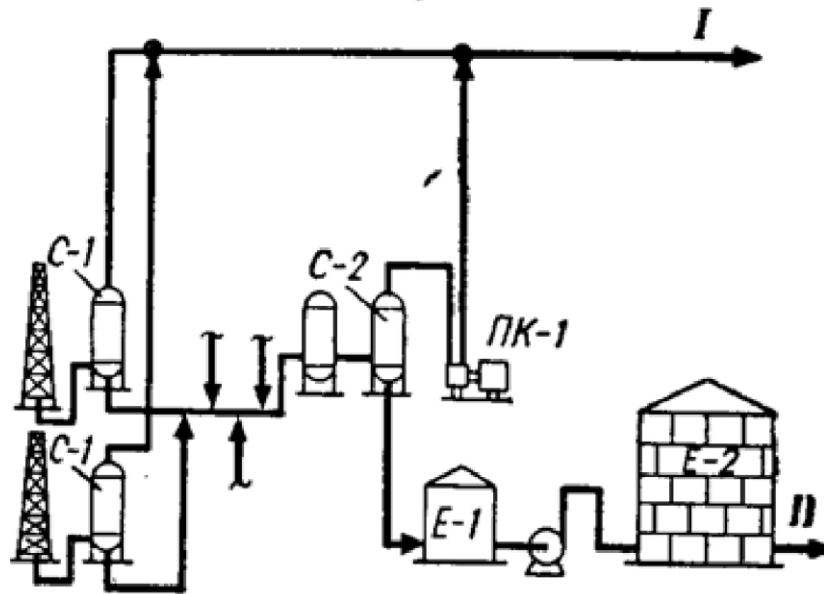
## 1.1 Стабілізація нафти

Незважаючи на ретельно організовану багатоступеневу сепарацію на всіх етапах первинної підготовки, сира нафта, що надходить із промислів, залишається збагаченою леткими компонентами, передусім вуглеводнями низької молекулярної маси, серед яких переважають метан, етан, пропан і бутан (C1–C4). Присутність таких компонентів у нафті призводить до значних втрат цінної продукції як у процесах перекачування, так і під час зберігання та транспортування. Легкі фракції, що залишаються в нафті після первинної сепарації, частково випаровуються, спричиняючи не тільки технологічні втрати, а й небажані викиди в атмосферу, що погіршують екологічну ситуацію на місці експлуатації об'єкта.

Для усунення цих проблем і забезпечення стабільності фізико-хімічного складу нафти застосовуються спеціалізовані установки стабілізації. Основною метою стабілізаційного процесу є вилучення залишкових легких вуглеводнів шляхом їх спрямованого випаровування, конденсації та фракціонування перед подальшим транспортуванням або переробкою. Ці процеси забезпечують не лише втрати легколетких фракцій, а й отримання додаткових цінних ресурсів, які можуть бути повторно залучені в технологічні цикли (наприклад, як паливо або як сировина для подальшої глибокої переробки).

Стабілізаційні установки зазвичай розміщують поблизу місць видобутку нафти, що дозволяє реалізувати первинну обробку без втрат на етапах транспортування. Одним із найбільш ефективних підходів до стабілізації є застосування ректифікаційного методу, який дозволяє за температурного та тискового режимів точно відокремити фракції з різними температурними межами кипіння. Типова схема потоків установки стабілізації нафти наведена на рис. 1.1.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



I – нафта нестабільна (сиря); II – нафта стабільна; III – газ несконденсований; IV – газ скраплений (головка стабілізації)

Рисунок 1.1 – Схема потоків установки для стабілізації нафти

Сиря нестабільна нафта, що надходить із установки первинної сепарації (позначено як потік I), спочатку транспортується в теплообмінник Т-1, де вона нагрівається за рахунок теплової енергії, яку передає стабілізована нафта, що вже пройшла обробку в колоні. Такий теплообмін дозволяє досягти високої ефективності енергозбереження шляхом рекуперації тепла [1]. Після цього підігрівання продовжується в паровому підігрівачі Т-2, який забезпечує досягнення температури, необхідної для фазового поділу компонентів у колоні.

Підігріта сировина надходить до ректифікаційної колони-стабілізатора К-1, де і відбувається основний процес видалення летких фракцій. Усередині колони реалізується класичний протитечійний масообмін: рідка фаза, спускаючись по тарілках униз, взаємодіє з паровою фазою, що піднімається вгору. Завдяки температурному градієнту та різниці леткості складників, відбувається розділення нафти на важчі компоненти (залишаються внизу) і легкі, що випаровуються. Нагрів нижньої частини колони здійснюється за допомогою трубчастої печі, яка функціонує як джерело теплового струменя для

						ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			12

забезпечення стабільного випаровування цільових фракцій.

Пари, що виділяються у верхній частині колони, містять переважно вуглеводні С1–С5. Ці пари охолоджуються в холодильнику-конденсаторі ХК-1, де відбувається часткова конденсація. Утворена двофазна суміш надходить до ємності-сепаратора Е-1, де здійснюється остаточний поділ на рідку та газову фази. Несконденсований газ (потік ІІІ) виводиться в технологічні лінії, де може бути використаний як енергоносіє. Конденсат, що складається з більш важких легких фракцій, частково повертається до верхньої частини колони К-1 для підтримання зрошення (рекурсивне підживлення), а решта передається на центральні газофракційні установки (ЦГФУ), де відбувається глибоке фракціонування (потік ІV).

У нижній частині колони-стабілізатора формується стабілізована нафта (потік ІІ), яка позбавлена легких вуглеводнів і має більш однорідний склад. Ця нафта транспортується назад у теплообмінник Т-1, де вона віддає накопичене тепло сирій нафті, що надходить на обробку. Після рекуперації теплоти її температура знижується до допустимого рівня в холодильнику перед зберіганням або транспортуванням.

Стабілізована нафта після обробки містить лише незначну кількість легких вуглеводнів (у межах 0,8–1,5 %), що відповідає промисловим нормативам і дозволяє безпечно транспортувати її без ризику втрат або надлишкового тиску у трубопроводах.

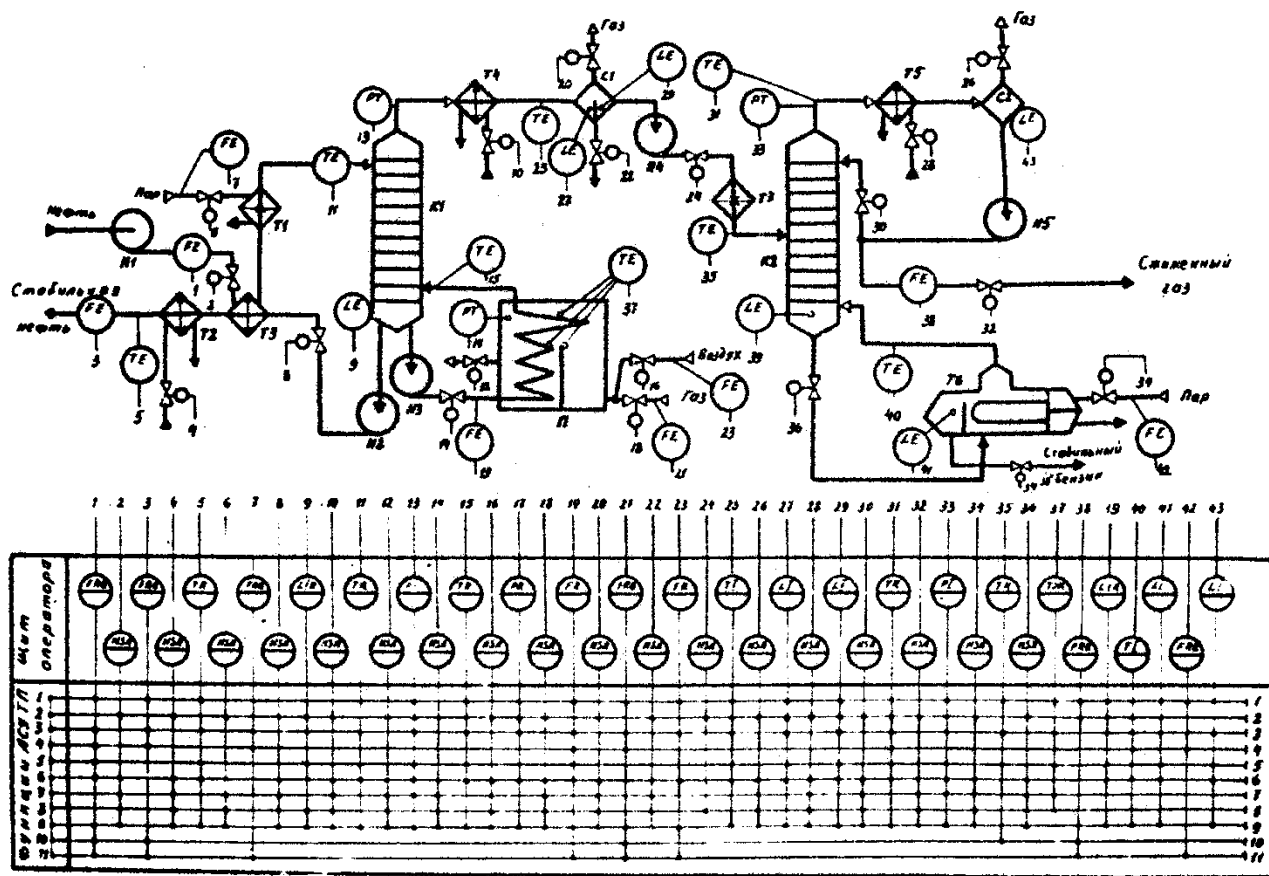
## 1.2 Функціональна схема АСУ ТП установки стабілізації нафти

Стабілізація нафти передбачає видалення легких вуглеводневих фракцій, таких як метан, етан і більша частина пропану, з метою одержання стабільного продукту, який характеризується сталим фракційним складом. Така оброблена нафта здатна зберігати свої фізико-хімічні властивості під час транспортування, зберігання та подальшої переробки. Для нафт із вмістом газоподібних компонентів понад 1,5% мас. застосовуються двоколонні установки, які

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

забезпечують більш глибоке розділення складників.

Функціональна схема АСУ ТП установки стабілізації нафти включає два основні колони — К1 для стабілізації сирової нафти та К2 для стабілізації газового бензину. Крім того, схема охоплює комплекс допоміжного обладнання, що забезпечує ефективне тепло- та масообмінне забезпечення процесу, зокрема трубчасту піч П, сепаратори С1 і С2, систему насосів Н1–Н5, та сім теплообмінних апаратів Т1–Т7, серед яких виділяються холодильники, підігрівачі, рибойлер та конденсатори.



П – піч; К1, К2 – колони; С1, С2 – сепаратори; Т1–Т7 – теплообмінні апарати

Рисунок 1.2 – Функціональна схема АСУ ТП установки стабілізації нафти

Первинне підігрівання сирової нафти здійснюється шляхом послідовного проходження через теплообмінник Т3, де тепло передається від стабільної нафти, а далі через паровий підігрівач Т1. Після нагріву до температури близько 60 °С нафта подається в колону К1 на верхній ярус тарілок. В цій колоні

реалізується масообмін між рідиною та піднімаючимися парами, що забезпечує ефективне вилучення легких фракцій. Температура в нижній частині колони підтримується в межах 130–150 °С за рахунок рециркуляції стабільної нафти через трубчасту піч П, де теплоносієм виступає продукт, що подається насосом Н3.

Стабільна нафта, після вилучення з нижньої частини колони К1, транспортується насосом Н2 через теплообмінник Т3, де вона віддає тепло сирій нафті, а потім через холодильник Т2 — до резервуару або на подальше використання [2].

Газоподібні продукти з верхньої частини колони К1 охолоджуються в холодильнику-конденсаторі Т4 і подаються в сепаратор С1, де розділяються на сухий газ, воду та конденсат газового бензину. Конденсат, після підігріву в теплообміннику Т7 (до ~70 °С), подається у випарну секцію другої колони К2. У колоні К2, яка функціонує при тиску 1,3–1,5 МПа, підтримується температурний режим 40–50 °С у верхній частині та 120–130 °С у нижній.

Установка рибойлера Т6 забезпечує теплопостачання до нижньої частини колони К2: частина стабільного бензину, циркулюючи через рибойлер, випаровується, поглинаючи тепло водяної пари (при температурі 160–180 °С), і повертається у колону для підвищення температури. Залишок бензину надходить у систему охолодження і далі — у резервуари.

Сепаратор С2, встановлений після колони К2, поділяє охолоджений газовий потік на сухий газ (що направляється в спільний газовий колектор) і скраплений газ, який відводиться насосом Н5. Частина останнього використовується для холодного орошення в колоні К2, а надлишок зберігається у газових приймачах.

АСУ ТП реалізує підтримання стабільних технологічних умов на основі регулювання витрати, температури та тиску на всіх ділянках технологічного процесу. На вході в колону К1 впроваджено систему стабілізації витрати та температури сирої нафти. Тиск у верхній частині колони стабілізується за

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

рахунок керованого відведення парів, тоді як рівень стабільної нафти внизу регулюється відповідно до її відведення насосом.

Температура внизу колони підтримується зміною інтенсивності циркуляції рідини через піч П, а охолодження стабільної нафти забезпечується роботою холодильників. Температура парів, що конденсуються, регулюється зміною режиму функціонування холодильника Т4. Аналогічна система регулювання реалізована і для колони К2, де передбачене управління температурою, тиском, рівнем рідини та тепловим балансом рибойлера Т6.

Важливою складовою є інтеграція засобів контролю та обліку кількості стабільної нафти, а також безперервний моніторинг температур потоків, що дозволяє забезпечити достовірну діагностику працездатності обладнання та коригування режимів у реальному часі. Впровадження систем автоматичного регулювання дозволяє досягти стійкої роботи установки, підвищення ефективності теплообміну, а також зниження енергетичних втрат та мінімізацію викидів у довкілля.

### **1.3 Логіка керування АСУ процесу стабілізації нафти**

У контексті автоматизації технологічного процесу стабілізації нафти структурований опис логіки керування передбачає поетапний аналіз і обґрунтування взаємодії між технологічними об'єктами, системами вимірювання, регулюванням і засобами виконавчої дії в межах інтегрованої автоматизованої системи. Такий опис фокусується не на простому переліку регульованих параметрів, а на розкритті причинно-наслідкових зв'язків у роботі установки, що реалізуються на основі комплексного аналізу динаміки процесу, його внутрішніх зворотних зв'язків і впливу збурень.

Система керування побудована за принципом розподілу обов'язків між локальними регуляторами і централізованою обчислювальною підсистемою, що реалізує високорівневе логічне керування. Пускова процедура установки ініціюється через систему диспетчерського контролю, яка проводить первинну

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

діагностику на предмет відповідності граничним умовам – тиску, температурі, рівням рідин у резервуарах та трубопроводах. У разі відповідності початкових умов визначеним стандартам активуються алгоритми фазового запуску: насоси, теплообмінники та печі вводяться в робочий режим із дотриманням контрольованого зростання температур і витрат, що унеможлиблює виникнення гідравлічних чи теплових ударів.

В основі регулювання лежить концепція стабілізації динамічної рівноваги процесу. Сировинний потік, що надходить до установки, підлягає попередньому підігріву, температура якого визначає ефективність подальшого масообміну в колоні. Цей показник безперервно контролюється за допомогою термоперетворювачів опору, сигнали від яких надходять до входу контурів регулювання температури, що реалізуються через PID-регулятори з адаптивним настроюванням коефіцієнтів, з урахуванням теплової інерційності теплообмінного обладнання.

Потрапляючи в стабілізаційну колону, нафта вступає в інтенсивну масообмінну взаємодію із паровим потоком, що формується внаслідок підвищеної температури в нижній частині. Тут логіка керування зосереджена на забезпеченні сталої температурної градієнтності по висоті колони, що забезпечується рециркуляцією гарячої стабільної нафти через трубчасту піч. Температурні параметри контролюються як на виході з печі, так і в зоні введення струменя до колони, що дозволяє реалізувати регулювання за відхиленням із прогнозуванням збурень за допомогою предиктивного алгоритму. При цьому режим роботи печі адаптується до змін у витраті сирової нафти або флуктуацій теплового навантаження.

Паралельно із температурним режимом в колоні керується і тиск. Відведення газоподібних компонентів з верхньої частини колони здійснюється через холодильник-конденсатор, продуктивність якого регулюється зміною витрати охолоджувального агента. Зміна температури в цій ділянці безпосередньо впливає на тиск, тому реалізується зворотний зв'язок, що формує

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

імпульс на виконавчі органи, які відповідають за циркуляцію охолоджувальної рідини. Це дозволяє досягти стабільного тиску в межах робочого діапазону, необхідного для забезпечення фазового поділу в колоні та уникнення нерівноважного режиму випаровування.

Важливу роль у структурі логіки керування відіграє контроль рівнів рідини в сепараторах. Автоматизована система, отримуючи сигнали від диференційно-ємнісних або ультразвукових датчиків рівня, реалізує регулювання шляхом управління витратними пристроями на лініях відведення стабільної нафти, води чи сконденсованих вуглеводнів. Це необхідно для підтримання меж фазового поділу, що безпосередньо впливає на селективність сепарації та ефективність подальшого рекупераційного етапу.

У колоні стабілізації газового бензину застосовується подібний підхід. Алгоритм передбачає двоконтурне регулювання: по температурі і по рівню в нижній частині. Рибойлер, через який циркулює бензин, працює в умовах змінного теплового навантаження, що залежить від складу конденсату та витрат пари. Логіка керування забезпечує коригування подачі пари на основі інтегрального показника температурного відхилення в колоні, що дозволяє компенсувати повільні флуктуації теплового навантаження без ризику перегріву. У верхній частині другої колони тиск і температура стабілізуються за рахунок регульованого охолодження газового потоку, що дозволяє уникати акумуляції нелетких фракцій у газовій фазі [3].

Загалом, уся система керування функціонує в умовах мультиваріантного середовища з численними зворотними зв'язками, що обумовлює застосування каскадних структур управління, у яких окремі параметри взаємопов'язані через вторинні контури. Координація між локальними регуляторами здійснюється за допомогою центрального контролера, що забезпечує інтелектуальну диспетчеризацію процесу на основі алгоритмів логічного моделювання і трендової аналітики. Таким чином, структура логіки керування в установці стабілізації нафти являє собою адаптивну, самоузгоджену систему, орієнтовану

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

на підтримання енергетично та технологічно оптимального режиму в умовах змінних вхідних параметрів та зовнішніх збурень.

#### 1.4 Хімізм процесу стабілізації нафти

Хімізм процесу стабілізації нафти є складним фізико-хімічним явищем, що охоплює механізми фазових переходів, тепломасообміну, а також частково термічної дегазації вуглеводневих компонентів. Хоча цей процес не супроводжується типовими хімічними реакціями розриву або утворення нових хімічних зв'язків, його суть полягає у керованому розподілі багатокомпонентної суміші на фракції з різними температурними та тисковими характеристиками.

Основою стабілізації є процес ректифікації, у якому реалізується багаторазове випаровування й конденсація легких вуглеводнів. При подачі сирової нафти до нижньої або середньої частини колони (К1), вона потрапляє в середовище, де температура зростає знизу догори, тоді як тиск, як правило, підтримується стабільним. Завдяки цьому утворюється тепловий градієнт, який забезпечує фазовий поділ. У таких умовах відбувається десорбція і випаровування легких вуглеводнів (С1–С4) з рідкої фази.

З фізико-хімічної точки зору, випаровування компонентів є наслідком порушення їх фазової рівноваги при підвищенні температури. Кожен компонент має свою температуру кипіння при заданому тиску. Наприклад, метан кипить за  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , етан за  $-88,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , пропан за  $-42,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , бутан за  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При підігріванні сирової нафти до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  і вище ці компоненти вже перебувають у газовому стані, тому легко виділяються з рідкої фази [4].

У верхній частині ректифікаційної колони газова суміш охолоджується, частина компонентів конденсується відповідно до їх температур конденсації. Водночас у сепараторі С1 чи Є-1 реалізується розділення на дві фази — газоподібну та рідку — на основі різної леткості і густини складників. Рідка фаза містить переважно скраплені вуглеводні (в основному С3 і С4), які можуть повертатися в колону як зрошення або направлятися на подальшу переробку.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таким чином, з точки зору хімізму, процес стабілізації включає:

- Механізм десорбції легких фракцій із нафтової рідини під дією підвищеної температури;
- Фізичне випаровування складників із низькою температурою кипіння;
- Механізм ректифікаційного поділу, заснований на різниці леткості;
- Конденсацію вуглеводневих парів у теплообмінниках;
- Фазову сепарацію у вертикальних ємностях із поділом за густиною та агрегатним станом.

У кінцевому підсумку стабілізована нафта являє собою рідинну суміш із переважно важчих вуглеводнів (C5+), де частка розчинених газів мінімізована (до 0,8–1,5 %), а втрати легких компонентів при зберіганні чи транспортуванні практично виключаються. Такий підхід дозволяє не лише покращити фізико-хімічну стабільність нафти, але й створити умови для селективного вилучення цінних вуглеводневих компонентів, що підвищує економічну ефективність усього технологічного ланцюга.

### **Висновки до розділу**

У даному розділі було розглянуто фізико-хімічні основи, технологічну сутність та структурну організацію процесу стабілізації нафти, що реалізується на спеціалізованих промислових установках із використанням принципів ректифікаційного поділу. Детально проаналізовано функціонування основних апаратів — ректифікаційних колон, теплообмінників, печей та сепараторів — у межах автоматизованої системи керування, що забезпечує стабільність параметрів технологічного процесу.

Показано, що головною метою стабілізації є вилучення легких вуглеводнів (C1–C4), які залишаються в нафті після промислової сепарації. Процес ґрунтується на багатократному фазовому переході легколетких компонентів під дією температури та тиску з подальшою конденсацією й сепарацією. На підставі

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

аналізу функціональної схеми було обґрунтовано ефективність теплоенергетичних рішень, реалізованих у контурі циркуляції стабільної нафти та газового бензину.

Сформовано уявлення про хімізм процесу, що відображає комплекс фізико-хімічних механізмів, пов'язаних із десорбцією, випаровуванням і конденсацією вуглеводневих компонентів. Особливу увагу приділено ролі автоматизованої системи керування, яка забезпечує стабільність температурних, тискових і рівневих параметрів, дозволяючи підтримувати оптимальні умови для фракціонування нафти та мінімізувати втрати цінних ресурсів.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

### 2.1 Опис процесу стабілізації нафти та ідентифікація об'єкту керування

Вибір контуру автоматичного регулювання температури в ребойлері дистиляційної колони стабілізації нафти для розроблення АСК обґрунтовується комплексом технологічних, економічних та експлуатаційних факторів, що роблять цей контур критично важливим для забезпечення ефективності всього процесу стабілізації.

Процес стабілізації нафти є одним з найбільш енергоємних та технологічно складних етапів первинної переробки нафти, де від точності підтримання температурного режиму в ребойлері безпосередньо залежить якість кінцевого продукту та економічна ефективність виробництва. Для установки продуктивністю 2000 м<sup>3</sup>/добу навіть незначні відхилення температури від оптимальних значень можуть призвести до суттєвих економічних втрат та погіршення якості продукції [5].

Температурний режим в ребойлері колони стабілізації визначає інтенсивність випаровування легких фракцій з нафтопродукту, що безпосередньо впливає на ступінь дегазації нафти. При температурі 180°C, яка підтримується в ребойлері, забезпечується оптимальний баланс між повнотою виділення легких вуглеводнів та енергетичними витратами на процес. Зниження температури навіть на 5-10°C призводить до неповного видалення газових компонентів, що робить стабілізовану нафту непридатною для транспортування та зберігання через підвищений тиск насичених парів.

Підвищення температури понад розрахункові значення спричиняє надмірне випаровування не тільки газових компонентів, але й цінних легких фракцій бензину, що призводить до зниження виходу товарних продуктів та економічних втрат. Розрахунки показують, що для установки продуктивністю

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

2000 м<sup>3</sup>/добу кожен градус перевищення температури може призвести до втрати до 2-3 тонн бензинових фракцій на добу, що в грошовому еквіваленті становить значні суми.

Ребойлер як об'єкт керування характеризується складною динамікою теплообмінних процесів, що робить його найбільш критичним елементом системи з точки зору автоматизації. Великий об'єм продукту в ребойлері (15 м<sup>3</sup>) та висока теплоємність системи (24,57 МДж/К) обумовлюють значну інерційність процесу з постійною часу 435 секунд. Ця інерційність створює складності для оператора при ручному керуванні, оскільки результат зміни подачі теплоносія проявляється через значний час, що може призвести до перерегулювання та нестабільності процесу.

Транспортне запізнення в 45 секунд, зумовлене часом проходження теплоносія від регулюючого клапана до ребойлера та інерційністю теплообмінних процесів, додатково ускладнює керування системою. Це запізнення робить практично неможливим ефективне ручне регулювання, особливо при швидких збуреннях в системі, таких як зміна витрати сировини або параметрів теплоносія.

Коефіцієнт передачі об'єкта 14,16 К свідчить про високу чутливість температури до зміни подачі теплоносія, що вимагає точного дозування керуючого впливу. Навіть незначні зміни в положенні регулюючого клапана можуть призвести до суттєвих змін температури, що підкреслює необхідність використання автоматичної системи керування з високою точністю позиціонування виконавчих механізмів.

Економічне обґрунтування автоматизації цього контуру базується на аналізі витрат енергоресурсів та втрат продукції. Ребойлер споживає теплову енергію в кількості 3627,5 кВт, що при безперервній роботі установки становить понад 31,7 ГВт·год на рік. Навіть 5% економія енергії за рахунок оптимального керування температурним режимом дає значний економічний ефект, особливо з урахуванням постійного зростання цін на енергоносії.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Безпечність процесу також є критично важливим фактором вибору цього контуру для автоматизації. Перегрів продукту в ребойлері може призвести до термічного розкладання нафтопродуктів з утворенням твердих відкладень на поверхні теплообміну, що знижує ефективність теплопередачі та може призвести до локальних перегрівів і пошкодження обладнання. Автоматична система керування забезпечує постійний контроль температурного режиму та швидке реагування на відхилення, запобігаючи аварійним ситуаціям.

Якість продукції безпосередньо залежить від стабільності температурного режиму в ребойлері. Коливання температури призводять до нерівномірного видалення легких фракцій, що відображається на показниках тиску насичених парів стабілізованої нафти. Для забезпечення відповідності продукції стандартам ДСТУ вимагається підтримання температури з точністю  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , що практично неможливо досягти при ручному керуванні з урахуванням інерційності системи.

Інтеграція контуру температурного регулювання в загальну систему автоматизації установки дозволяє реалізувати каскадні та адаптивні алгоритми керування, які враховують взаємозв'язок між різними параметрами процесу. Температура в ребойлері впливає на тиск у колоні, швидкість подачі флегми, склад дистиляту та інші параметри, що робить цей контур центральним елементом системи керування всією установкою.

Надійність роботи установки значно підвищується при автоматизації температурного контуру через зменшення ймовірності помилок оператора, особливо в нічні зміни та вихідні дні. Автоматична система забезпечує постійний моніторинг параметрів та швидке реагування на збурення, що особливо важливо для безперервних процесів нафтопереробки [6].

Можливість реалізації оптимальних алгоритмів керування, таких як ПІД-регулювання з адаптацією параметрів або модель-прогнозуюче керування, дозволяє мінімізувати енергетичні витрати при забезпеченні високої якості регулювання. Сучасні мікропроцесорні регулятори можуть реалізувати складні алгоритми компенсації транспортного запізнення та нелінійностей

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

характеристик об'єкта.

Діагностичні можливості автоматизованої системи дозволяють виявляти несправності обладнання на ранніх стадіях, що запобігає аварійним зупинкам та зменшує витрати на ремонт. Контроль динамічних характеристик контуру дає можливість виявити засмічення теплообмінних поверхонь, износ регулюючої арматури або інші проблеми до їх критичного розвитку.

## 2.2 Отримання математичної моделі обраного об'єкту керування

Для установки стабілізації нафти розглянемо контур автоматичного регулювання температури в дистиляційній колоні стабілізації з конкретними числовими параметрами, характерними для промислової установки продуктивністю 2000 м<sup>3</sup>/добу.

Об'єкт регулювання представляє собою ребойлер колони стабілізації об'ємом  $V = 15 \text{ м}^3$ , заповнений нафтопродуктом з густиною  $\rho = 780 \text{ кг/м}^3$  та питомою теплоємністю  $c = 2100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Робоча температура в ребойлері підтримується на рівні  $T_{\text{роб}} = 180^\circ\text{C}$  при тиску  $P = 0,8 \text{ МПа}$ .

Фізична модель процесу базується на рівнянні теплового балансу ребойлера. Маса продукту в апаті становить  $m = \rho V = 780 \times 15 = 11700 \text{ кг}$ . Теплоємність системи  $C = mc = 11700 \times 2100 = 24,57 \text{ МДж/К}$ .

Коефіцієнт теплопередачі від стінки ребойлера до продукту складає  $\alpha = 1200 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ , площа теплообміну  $F = 45 \text{ м}^2$ . Загальний коефіцієнт теплопередачі  $K_T = \alpha F = 1200 \times 45 = 54000 \frac{\text{Вт}}{\text{К}} = 54 \text{ кВт/К}$ .

Рівняння теплового балансу записується у вигляді:

$$C \left( \frac{dT}{dt} \right) = Q_{\text{пар}} - K_T(T - T_{\text{кип}}) - Q_{\text{втрат}}$$

де  $Q_{\text{пар}}$  - теплота від пари, що надходить через регулюючий клапан,  $T_{\text{кип}} = 120^\circ\text{C}$  - температура кипіння легких фракцій при робочому тиску,  $Q_{\text{втрат}}$  - теплові втрати в навколишнє середовище.

Підведена теплота залежить від ступеня відкриття регулюючого клапана:

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$Q_{\text{пар}} = K_q \times u(t)$ , де  $K_q = 800$  кВт - максимальна теплова потужність при повністю відкритому клапані,  $u(t)$  - відносний ступінь відкриття клапана ( $0 \leq u \leq 1$ ).

Теплові втрати в навколишнє середовище при температурі  $T_{\text{ос}} = 25^\circ\text{C}$  становлять  $Q_{\text{втр}} = K_{\text{втр}}(T - T_{\text{ос}})$ , де  $K_{\text{втр}} = 2,5$  кВт/К.

У робочій точці встановлюється баланс:

$$Q_{\text{пар}_0} = K_T(T_{\text{роб}} - T_{\text{кип}}) + K_{\text{втр}}(T_{\text{роб}} - T_{\text{ос}}) = 54(180 - 120) + 2,5(180 - 25) = 3240 + 387,5 = 3627,5 \text{ кВт.}$$

$$\text{Відносне відкриття клапана в робочій точці: } u_0 = \frac{Q_{\text{пар}_0}}{K_q} = \frac{3627,5}{800} = 0,453.$$

Лінеаризуючи рівняння навколо робочої точки та вводячи відхилення  $\Delta T = T - T_{\text{роб}}$ ,  $\Delta u = u - u_0$ , отримуємо:

$$C \left( \frac{d\Delta T}{dt} \right) = K_q \times \Delta u - (K_T + K_{\text{втр}}) \times \Delta T$$

Постійна часу об'єкта:

$$\tau = \frac{C}{K_T + K_{\text{втр}}} = 24,57 \times \frac{10^6}{54000 + 2500} = \frac{24570000}{56500} = 435 \text{ с} = 7,25 \text{ хв.}$$

$$\text{Коефіцієнт передачі об'єкта: } K_{\text{об}} = \frac{K_q}{K_T + K_{\text{втр}}} = \frac{800000}{56500} = 14,16 \text{ К.}$$

Транспортне запізнення зумовлене часом проходження теплоносія від клапана до ребойлера та інерційністю теплообміну. Для даної установки  $\tau_d = 45$  с.

Передавальна функція об'єкта регулювання:

$$W_{\text{об}}(s) = 14,16 \times \frac{e^{-45s}}{435s + 1}.$$

Регулюючий клапан має лінійну витратну характеристику з коефіцієнтом передачі  $K_{\text{кл}} = 1$  (безрозмірний) та постійною часу  $\tau_{\text{кл}} = 8$  с:

$$W_{\text{кл}}(s) = \frac{1}{8s + 1}.$$

Датчик температури - термоперетворювач опору РТ100 з уніфікованим вихідним сигналом 4-20 мА. Діапазон вимірювання 0-300°C відповідає струму 4-20 мА. Коефіцієнт передачі датчика:  $K_d = \frac{20-4}{300-0} = \frac{16}{300} = 0,0533$  мА/К. Постійна

						ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			26

часу датчика  $\tau_d = 12$  с:

$$W_{d(s)} = \frac{0,0533}{12s + 1}.$$

Завершимо детальне виведення передавальної функції об'єкта керування з усіма проміжними кроками та обґрунтуваннями.

З вашого рівняння теплового балансу:

$$C \left( \frac{d\Delta T}{dt} \right) = K_q \times \Delta u - (K_T + K_{втр}) \times \Delta T$$

Підставляємо числові значення:

$$24,57 \times 10^6 \left( \frac{d\Delta T}{dt} \right) = 800000 \times \Delta u - (54000 + 2500) \times \Delta T,$$

$$24570000 \left( \frac{d\Delta T}{dt} \right) = 800000 \times \Delta u - 56500 \times \Delta T.$$

Ділимо обидві частини рівняння на 24570000:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \left( \frac{800000}{24570000} \right) \times \Delta u - \left( \frac{56500}{24570000} \right) \times \Delta T,$$

$$\frac{d\Delta T}{dt} = 0,03256 \times \Delta u - 0,002299 \times \Delta T.$$

Перепишемо у стандартній формі диференціального рівняння першого порядку:

$$\frac{d\Delta T}{dt} + 0,002299 \times \Delta T = 0,03256 \times \Delta u.$$

Постійна часу  $\tau$  визначається як обернена величина до коефіцієнта при  $\Delta T$ :

$$\tau = \frac{1}{0,002299} = 435 \text{ с.}$$

Це підтверджує ваш розрахунок:  $\tau = \frac{C}{K_T + K_{втр}} = \frac{24570000}{56500} = 435$  с.

Коефіцієнт передачі об'єкта  $K_{об}$  знаходимо як відношення коефіцієнта при керуючому впливі до коефіцієнта при вихідній змінній:

$$K_{об} = \frac{0,03256}{0,002299} = 14,16 \text{ К.}$$

Це також підтверджує ваш розрахунок:  $K_{об} = \frac{K_q}{K_T + K_{втр}} = \frac{800000}{56500} = 14,16$  К.

Диференціальне рівняння у стандартній формі:

$$\tau \left( \frac{d\Delta T}{dt} \right) + \Delta T = K_{об} \times \Delta u.$$

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$435 \left( \frac{d\Delta T}{dt} \right) + \Delta T = 14,16 \times \Delta u.$$

Для врахування транспортного запізнення  $\tau_d = 45$  с, керуючий вплив  $\Delta u$  діє на об'єкт із затримкою:

$$435 \left( \frac{d\Delta T}{dt} \right) + \Delta T = 14,16 \times \Delta u(t - 45).$$

Застосовуючи пряме перетворення Лапласа до цього рівняння з нульовими початковими умовами:

$$L \left\{ 435 \left( \frac{d\Delta T}{dt} \right) + \Delta T \right\} = L \{ 14,16 \times \Delta u(t - 45) \},$$

$$435s \times \Delta T(s) + \Delta T(s) = 14,16 \times e^{-45s} \times \Delta u(s).$$

Виносимо  $\Delta T(s)$  за дужки:

$$\Delta T(s) \times (435s + 1) = 14,16 \times e^{-45s} \times \Delta u(s).$$

Виражаємо передавальну функцію як відношення зображення вихідної величини до зображення вхідної величини:

$$W_{об(s)} = \frac{\Delta T(s)}{\Delta u(s)} = \frac{14,16 \times e^{-45s}}{435s + 1}$$

Таким чином, передавальна функція об'єкта керування остаточно записується у вигляді:

$$W_{об(s)} = 14,16 \times \frac{e^{-45s}}{435s + 1}.$$

Ця передавальна функція характеризує:

- Інерційну ланку першого порядку з постійною часу  $\tau = 435$  с = 7,25 хв;
- Статичний коефіцієнт передачі  $K_{об} = 14,16$  К;
- Транспортне запізнення  $\tau_d = 45$  с = 0,75 хв.

Фізичний зміст параметрів:

- Постійна часу  $\tau = 435$  с характеризує інерційність теплових процесів у ребойлері великого об'єму;
- Коефіцієнт передачі  $K_{об} = 14,16$  К показує, що при зміні відносного відкриття клапана на 1% температура в усталеному режимі зміниться на 14,16 °С;
- Транспортне запізнення  $\tau_d = 45$  с обумовлене часом транспортування

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

теплоносія та інерційністю теплообмінних процесів.

Ця передавальна функція повністю описує динамічні властивості ребойлера як об'єкта керування в контурі регулювання температури установки стабілізації нафти.

### Висновки до розділу

В даному розділі проведено розробку математичної моделі та аналіз динамічних характеристик контуру автоматичного регулювання температури ребойлера колони стабілізації нафти для промислової установки продуктивністю 2000 м<sup>3</sup>/добу.

Обґрунтовано вибір контуру регулювання температури в ребойлері як критично важливого для забезпечення якості продукції, енергетичної ефективності та безпечності технологічного процесу стабілізації нафти.

На основі рівняння теплового балансу розроблено математичну модель об'єкта керування з реальними промисловими параметрами: об'ємом  $V = 15$  м<sup>3</sup>, теплоємністю системи  $C = 24,57$  МДж/К та коефіцієнтом теплопередачі  $K_T = 54$  кВт/К. Проведено лінеаризацію моделі навколо робочої точки при температурі 180°C.

Розраховано динамічні характеристики об'єкта: постійну часу  $\tau = 435$  с, коефіцієнт передачі  $K_{об} = 14,16$  К та транспортне запізнення  $\tau_d = 45$  с.

Отримано передавальну функцію об'єкта у вигляді  $W_{об}(s) = 14,16 \times \frac{e^{-45s}}{435s + 1}$ .

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

### 3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ РЕБОЙЛЕРА КОЛОНИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАФТИ В MATLAB SIMULINK

#### 3.1 Теоретичні основи синтезу системи керування

Розробка ефективної системи автоматичного керування температурним режимом ребойлера є складним інженерним завданням, що потребує глибокого розуміння динаміки теплообмінних процесів та сучасних методів теорії автоматичного керування. Температурний контур ребойлера характеризується складною динамікою, обумовленою великою тепловою інерцією системи, наявністю транспортного запізнення та нелінійними залежностями між керуючими та керованими величинами.

Промислова установка стабілізації нафти продуктивністю 2000 м<sup>3</sup>/добу представляє собою складний технологічний комплекс, де точність підтримання температурного режиму безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту, енергетичну ефективність процесу та безпеку експлуатації. Ребойлер як ключовий елемент ректифікаційної колони забезпечує необхідну кількість теплоти для випаровування легких фракцій нафти, що визначає ефективність поділу компонентів.

#### 3.2 Аналіз передавальної функції об'єкта керування

Математична модель об'єкта керування представлена передавальною функцією:

$$W_{об}(s) = \frac{14.16 \times e^{-45s}}{435s + 1}.$$

Детальний аналіз даної передавальної функції розкриває фізичну суть процесів, що відбуваються в ребойлері. Коефіцієнт передачі  $K = 14.16 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{м}^3/\text{год})$  характеризує статичну залежність між витратою теплоносія та температурою в ребойлері. Цей відносно високий коефіцієнт свідчить про значну чутливість температурного режиму до змін керуючого впливу, що з одного боку забезпечує

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

хорошу керованість процесу, а з іншого - потребує точного дозування керуючих впливів для уникнення коливань температури (рис. 3.1).

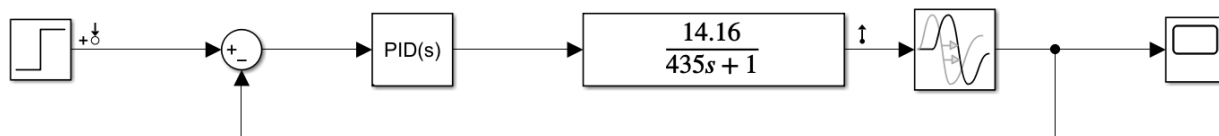


Рисунок 3.1 – Одноконтурна АСК

Постійна часу  $\tau = 435$  секунд відображає теплову інерційність системи ребойлер-теплообмінник. Така значна інерційність обумовлена великою масою металу теплообмінного обладнання, об'ємом рідини в ребойлері та особливостями теплопередачі через стінки трубного пучка. Практично це означає, що система потребує понад 7 хвилин для досягнення 63% від кінцевого значення при ступінчастій зміні керуючого впливу [7].

Транспортне запізнення  $\tau_0 = 45$  секунд пов'язане з часом транспортування теплоносія від точки регулювання його витрати до безпосередньо зони теплообміну в ребойлері. Це запізнення суттєво ускладнює процес керування, оскільки результат керуючого впливу проявляється лише через 45 секунд після його подачі.

### 3.3 Методологія синтезу ПІД-регулятора

Синтез ПІД-регулятора для системи керування температурним режимом ребойлера базується на класичних інженерних методах налаштування, адаптованих до специфіки об'єктів з запізненням. Найбільш поширеними та ефективними є методи Зіглера-Нічолса та симетричного оптимуму, кожен з яких має свої переваги залежно від вимог до якості перехідного процесу.

Метод Зіглера-Нічолса забезпечує швидку реакцію системи на збурення, що особливо важливо в умовах змінного складу сировини та флуктуацій технологічних параметрів. Для об'єкта з запізненням застосовується

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

модифікована методика, що враховує співвідношення між постійною часу та часом запізнення.

Пропорційний коефіцієнт розраховується за формулою:

$$K_p = \frac{1.2 \times \tau}{K \times \tau^0} = \frac{1.2 \times 435}{14.16 \times 45} = \frac{522}{637.2} = 0.819.$$

Інтегральна постійна часу визначається як:  $T_i = 2 \times \tau^0 = 2 \times 45 = 90$  секунд.

Диференціальна постійна часу становить:  $T_d = 0.5 \times \tau^0 = 0.5 \times 45 = 22.5$  секунди.

Отримані параметри забезпечують достатньо швидку реакцію системи на збурення при збереженні прийнятного рівня перерегулювання. Передавальна функція ПД-регулятора в стандартній формі набуває вигляду:

$$W_p(s) = K_p \times \left(1 + \frac{1}{T_i \times s} + T_d \times s\right) = 0.819 \times \left(1 + \frac{1}{90s} + 22.5s\right).$$

Альтернативний підхід базується на методі симетричного оптимуму, який орієнтований на забезпечення максимальної стійкості системи керування. Цей метод особливо доцільний для критично важливих процесів, де стабільність функціонування має пріоритет над швидкодією. Параметри регулятора в цьому випадку розраховуються наступним чином:

Інтегральна постійна часу:  $T_i = 4 \times \tau^0 = 4 \times 45 = 180$  секунд.

Диференціальна постійна часу:  $T_d = \tau^0 = 45$  секунд.

Пропорційний коефіцієнт:  $K_p = \frac{\tau}{2 \times K \times \tau^{0.2}} = \frac{435}{2 \times 14.16 \times 45^2} = \frac{435}{57244.8} = 0.0076.$

Метод симетричного оптимуму забезпечує більш консервативне налаштування регулятора, що призводить до повільнішого, але більш стабільного перехідного процесу з мінімальним перерегулюванням.

### 3.4 Концептуальна схема реалізації в MATLAB Simulink

Створення повноцінної моделі системи керування в середовищі MATLAB Simulink потребує системного підходу до структурування всіх компонентів

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

системи. Основна ідея полягає в побудові модульної архітектури, де кожен блок відповідає за конкретну функцію в загальній схемі керування.

Центральним елементом моделі є блок завдання температури, який генерує еталонний сигнал для системи керування. В промислових умовах цей сигнал може формуватися оператором через систему управління або автоматично за допомогою алгоритмів оптимізації технологічного режиму. Для цілей моделювання та налаштування системи доцільно використовувати різноманітні типи вхідних сигналів: ступінчасті для аналізу перехідних процесів, синусоїдальні для дослідження частотних характеристик, та імпульсні для визначення швидкодії системи.

ПІД-регулятор реалізується через стандартний блок PID Controller, який дозволяє гнучко налаштовувати всі параметри керування. Важливою особливістю є правильне задання форми ПІД-закону. Для об'єктів з великим запізненням рекомендується використовувати паралельну форму ПІД-регулятора, оскільки вона забезпечує кращу стійкість при зміні параметрів об'єкта.

Особливу увагу слід приділити моделюванню обмежень керуючого сигналу. В реальних умовах витрата теплоносія не може змінюватися миттєво та має фізичні обмеження. Блок обмежувача (Saturation) моделює ці реальні обмеження, встановлюючи діапазон зміни керуючого сигналу від 0 до 100% максимальної витрати теплоносія. Додатково доцільно включити блок обмеження швидкості зміни сигналу (Rate Limiter) для моделювання інерційності виконавчих механізмів.

Моделювання об'єкта керування здійснюється через комбінацію двох блоків: блока транспортного запізнення (Transport Delay) з параметром 45 секунд та блока передавальної функції (Transfer Function) з чисельником [14.16] та знаменником [435 1]. Така декомпозиція дозволяє більш точно відобразити фізичну природу процесів в ребойлері та спрощує подальшу модифікацію моделі.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Математичний опис замкнутої системи керування представляється передавальною функцією:

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{W_p(s) \times W_{\text{об}}(s)}{(1 + W_p(s) \times W_{\text{об}}(s))}$$

Підставляючи значення для методу Зіглера-Нічолса:

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{0.819 \times \left(1 + \frac{1}{90s} + 22.5s\right) \times \frac{14.16 \times e^{-45s}}{435s + 1}}{1 + 0.819 \times \left(1 + \frac{1}{90s} + 22.5s\right) \times \frac{14.16 \times e^{-45s}}{435s + 1}}$$

### 3.5 Комплексний аналіз стійкості та якості керування

Оцінка стійкості системи керування є важливим етапом проектування, особливо для об'єктів з запізненням, які схильні до втрати стійкості при неправильному налаштуванні регулятора. Найбільш надійним методом аналізу стійкості для систем з запізненням є критерій Найквіста, який базується на аналізі амплітудно-фазової характеристики розімкнутої системи (рис. 3.2).

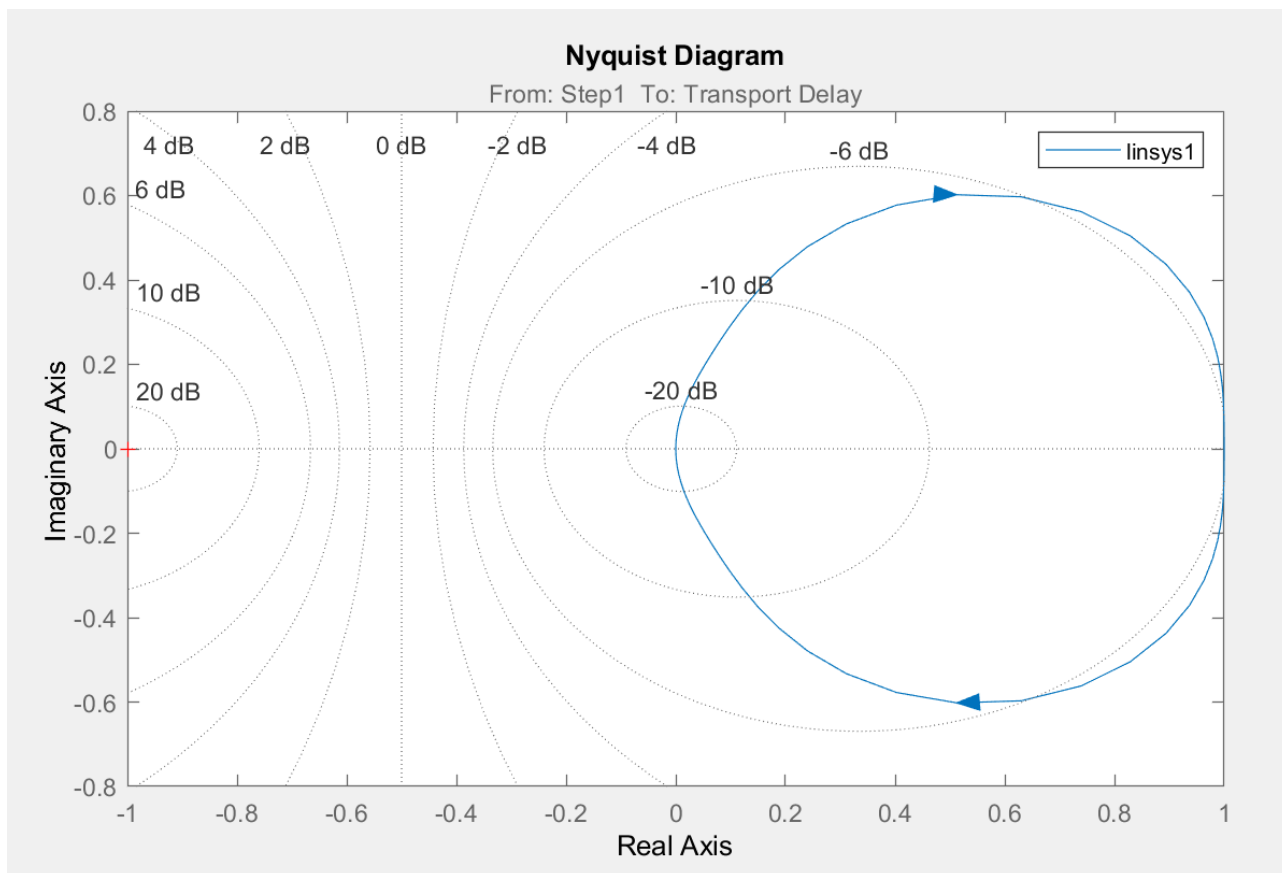


Рисунок 3.2 – Критерій Найквіста

Амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи визначається як:

						ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			34

$$W_{\text{роз}}(j\omega) = W_p(j\omega) \times W_{\text{об}}(j\omega)$$

Практичне застосування критерію Найквіста потребує побудови частотних характеристик системи в широкому діапазоні частот. Особливу увагу слід приділити критичній частоті  $\omega_{\pi}$ , при якій фазовий зсув дорівнює  $-180^\circ$ . На цій частоті система знаходиться на межі стійкості, і запас стійкості за амплітудою визначається як:

$$L_m = 20 \times \lg\left(\frac{1}{|W_{\text{роз}}(j\omega_{\pi})|}\right) \text{ дБ.}$$

Для забезпечення надійної роботи системи запас стійкості за амплітудою повинен становити не менше 6-12 дБ. Аналогічно, запас стійкості за фазою розраховується на частоті зрізу  $\omega_c$ , де модуль амплітудно-фазової характеристики дорівнює одиниці:

$$\varphi_m = 180^\circ + \arg W_{\text{роз}}(j\omega_c).$$

Рекомендований запас стійкості за фазою складає  $30-60^\circ$ . Системи з меншими запасами стійкості схильні до коливань та можуть втратити стійкість при зміні параметрів об'єкта або дії збурень.

Оцінка якості перехідних процесів здійснюється через аналіз реакції системи на ступінчасте збурення. При подачі ступінчастого сигналу завдання амплітудою  $\Delta T$  перехідна характеристика описується як зворотне перетворення Лапласа:

$$h(t) = \Delta T \times L^{-1}\left[W_{\text{зам}}(s) \times \left(\frac{1}{s}\right)\right].$$

Основними показниками якості перехідного процесу є час регулювання, перерегулювання та коливальність. Час регулювання  $t_p$  визначається як час, після якого відхилення від усталеного значення не перевищує 5% від амплітуди перехідного процесу:

$$t_p = \max\{t: |h(t) - h_{(\infty)}| > 0.05 \times h_{(\infty)}\}.$$

Перерегулювання характеризує максимальну похибку в процесі регулювання:  $\sigma = \left(\frac{h_{\text{max}} - h_{(\infty)}}{h_{(\infty)}}\right) \times 100\%$ .

Для систем керування температурним режимом ребойлера прийнятним

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вважається перерегулювання не більше 10-15%, що забезпечує стабільність технологічного процесу без суттєвих коливань якості продукції.

Інтегральна оцінка якості керування може здійснюватися через розрахунок інтегральної квадратичної помилки:

$$I_{\text{кв}} = \int_0^T e^2(t) dt,$$

де  $e(t) = T_{\text{зад}} - T_{\text{поточ}}(t)$  представляє помилку керування в часі. Мінімізація цього критерію забезпечує оптимальний баланс між швидкодією та точністю системи керування.

### 3.6 Стратегії компенсації збурень та підвищення ефективності керування

Промислові установки стабілізації нафти піддаються впливу численних збурень, які можуть суттєво вплинути на якість керування температурним режимом ребойлера. Основними джерелами збурень є зміни витрати та складу сировини, коливання тиску в системі, зміни температури навколишнього середовища та флуктуації властивостей теплоносія. Ефективна компенсація цих збурень потребує застосування комбінованих принципів керування.

Найбільш істотним збуренням є зміна витрати сировини, яка безпосередньо впливає на тепловий баланс ребойлера. Для компенсації цього збурення доцільно використовувати принцип керування за збуренням, який передбачає подачу компенсуючого сигналу на регулятор витрати теплоносія пропорційно до зміни витрати сировини.

Компенсуючий сигнал розраховується за формулою:

$$u_{\text{комп}}(s) = W_{\text{комп}}(s) \times f(s).$$

де  $f(s)$  представляє збурення по витраті сировини, а  $W_{\text{комп}}(s)$  - передавальна функція компенсатора, яка визначається як:  $W_{\text{комп}}(s) = -\frac{W_f(s)}{W_{\text{об}}(s)}$ .

У цій формулі  $W_f(s)$  описує вплив збурення на температуру в ребойлері. Правильно налаштований компенсатор дозволяє зменшити вплив збурень на 60-

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

80%, що суттєво покращує якість керування.

Додатковим засобом підвищення ефективності є застосування каскадної схеми керування, де основний контур температури доповнюється швидким внутрішнім контуром керування витратою теплоносія. Така архітектура забезпечує швидку компенсацію збурень у каналі керуючого впливу та підвищує загальну стійкість системи.

Перспективним напрямком розвитку є впровадження адаптивних алгоритмів керування, які автоматично підстроюють параметри регулятора відповідно до поточних умов експлуатації. Критерій оптимізації для адаптивної системи може бути сформульований як:

$$J = \int_0^T [q_1 \cdot e^{2(t)} + q_2 \cdot u^2(t)] dt \rightarrow \min ,$$

$q_1$  та  $q_2$  - вагові коефіцієнти, що визначають компроміс між точністю керування та енергетичними витратами. Адаптивний алгоритм періодично мінімізує цей критерій, коригуючи параметри регулятора на основі поточної статистики помилок керування.

### 3.7 Практичні аспекти впровадження та експлуатації

Практична реалізація синтезованої системи керування потребує врахування специфіки промислового обладнання та технологічних обмежень. Початкові параметри регулятора рекомендується встановлювати згідно з розрахунками за методом симетричного оптимуму, оскільки цей підхід забезпечує достатню стійкість для безпечного запуску системи.

Процедура точного налаштування повинна виконуватися поетапно, починаючи з пропорційної складової. На першому етапі інтегральна та диференціальна складові відключаються, і здійснюється налаштування пропорційного коефіцієнта до отримання прийнятної якості перехідного процесу. Потім поступово вводяться інтегральна та диференціальна складові з подальшим корегуванням всіх параметрів.

Особливу увагу слід приділити налаштуванню обмежень на швидкість

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

зміни керуючого впливу. Різкі зміни витрати теплоносія можуть призвести до термічних напружень в конструкції ребойлера, що знижує його довговічність. Рекомендована швидкість зміни керуючого сигналу не повинна перевищувати 5-10% за хвилину.

Для об'єктів з великим запізненням доцільно розглянути використання прогнозуючих алгоритмів керування (Model Predictive Control), які можуть бути реалізовані в Simulink через спеціалізовані блоки MPC Toolbox. Ці алгоритми використовують внутрішню модель об'єкта для прогнозування його поведінки та оптимізації керуючих впливів на горизонті прогнозування.

Система керування повинна також включати підсистему діагностики та аварійного захисту, яка контролює основні параметри процесу та забезпечує безпечну зупинку обладнання в аварійних ситуаціях. Це включає контроль максимальної та мінімальної температури в ребойлері, тиску теплоносія та його витрати.

Регулярне тестування та верифікація роботи системи керування є невід'ємною частиною експлуатації. Рекомендується проводити перевірку налаштувань регулятора щонайменше раз на квартал, а також після будь-яких модифікацій технологічного процесу або заміни обладнання.

$$J = \int_0^T [q_1 \cdot e^{2(t)} + q_2 \cdot u^2(t)] dt \rightarrow \min,$$

$q_1, q_2$  - вагові коефіцієнти, що визначають компроміс між точністю керування та витратами енергії.

### 3.8 Аналіз стійкості та якості керування системи температурного режиму ребойлера

Аналіз стійкості системи автоматичного керування температурним режимом ребойлера представляє особливу складність через наявність транспортного запізнення, яке робить систему нескінченновимірною. Традиційні методи аналізу стійкості, такі як критерій Гурвіца або корінний метод, не можуть бути безпосередньо застосовані до систем з запізненням,

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

оскільки характеристичне рівняння має нескінченну кількість коренів.

Наявність запізнення  $\tau_0 = 45$  секунд у передавальній функції об'єкта кардинально змінює динамічні властивості системи. Фізично це означає, що будь-яка зміна керуючого впливу проявляється в поведінці об'єкта лише через 45 секунд. За цей час система може накопичити значну помилку керування, що може призвести до втрати стійкості при неправильному налаштуванні регулятора.

Особливо критичним є співвідношення між часом запізнення  $\tau_0 = 45$  с та постійною часу об'єкта  $\tau = 435$  с. Коефіцієнт  $\tau_0/\tau = 45/435 \approx 0.103$  вказує на помірний рівень складності керування. Системи з коефіцієнтом менше 0.1 вважаються легкими для керування, а з коефіцієнтом більше 0.5 - важкими.

Критерій Найквіста є найбільш надійним методом аналізу стійкості систем з запізненням. Він базується на аналізі амплітудно-фазової характеристики розімкнутої системи в комплексній площині. Для нашої системи амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи має вигляд:

$$W_{\text{роз}}(j\omega) = W_p(j\omega) \times W_{\text{об}}(j\omega) = 0.819 \left( 1 + \frac{1}{j90\omega} + j22.5\omega \right) \times \frac{14.16 \times e^{-j45\omega}}{j435\omega + 1}.$$

Розділяючи цей вираз на дійсну та уявну частини, отримуємо:

Модуль:

$$|W_{\text{роз}}(j\omega)| = \frac{0.819 \times 14.16 \times \sqrt{\left(1 - \frac{22.5\omega}{90}\right)^2 + (22.5\omega)^2}}{\sqrt{1 + (435\omega)^2}}.$$

$$\text{Фаза: } \arg W_{\text{роз}}(j\omega) = \arctg\left(22.5\omega - \frac{1}{90\omega}\right) - \arctg(435\omega) - 45\omega.$$

Критична частота  $\omega_\pi$  визначається з умови  $\arg W_{\text{роз}}(j\omega_\pi) = -180^\circ$ , що призводить до трансцендентного рівняння:

$$\arctg\left(22.5\omega_\pi - \frac{1}{90\omega_\pi}\right) - \arctg(435\omega_\pi) - 45\omega_\pi = -\pi.$$

Розв'язування цього рівняння чисельними методами дає  $\omega_\pi \approx 0.0234$  рад/с, що відповідає періоду близько 4.5 хвилин.

На критичній частоті запас стійкості за амплітудою становить:

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

$$L_m = 20 \times \lg\left(\frac{1}{|W_{\text{роз}}(j\omega_\pi)|}\right) \approx 8.5 \text{ дБ.}$$

Цей запас є прийнятним для промислових систем, хоча бажано мати не менше 10-12 дБ для надійної роботи.

Визначення запасу стійкості за фазою. Частота зрізу  $\omega_c$  визначається з умови  $|W_{\text{роз}}(j\omega_c)| = 1$ . Для нашої системи це рівняння має вигляд:

$$\frac{11.59 \times \sqrt{\left(1 - \frac{22.5\omega_c}{90}\right)^2 + (22.5\omega_c)^2}}{\sqrt{1 + (435\omega_c)^2}} = 1.$$

Розв'язування дає  $\omega_c \approx 0.0187$  рад/с. На цій частоті запас стійкості за фазою становить:

$$\varphi_m = 180^\circ + \arg W_{\text{роз}}(j\omega_c) \approx 42^\circ.$$

Запас фази  $42^\circ$  забезпечує достатню стійкість системи з помірним рівнем коливальності перехідного процесу.

Аналіз якості перехідних процесів. Якість керування оцінюється через характеристики перехідного процесу при ступінчастій зміні завдання температури. Основними показниками є час регулювання, перерегулювання, коливальність та статична точність.

Час регулювання  $t_p$  визначається як час, після якого відхилення від усталеного значення не перевищує 5% від амплітуди збурення. Для систем з запізненням існує приблизна формула:

$$t_p \approx 3\tau + 2\tau^0 = 3 \times 435 + 2 \times 45 = 1395 \text{ секунд} \approx 23 \text{ хвилини.}$$

Цей відносно великий час регулювання обумовлений значною інерційністю теплообмінного процесу в ребойлері.

Перерегулювання  $\sigma$  характеризує максимальне відхилення керованої величини від її усталеного значення в процесі регулювання. Для ПІД-регулятора, налаштованого за методом Зіглера-Нічолса, очікуване перерегулювання становить:  $\sigma \approx 25-35\%$ .

Таке перерегулювання може бути неприйнятним для деяких технологічних процесів, тому може знадобитися більш консервативне налаштування

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулятора (рис. 3.3).

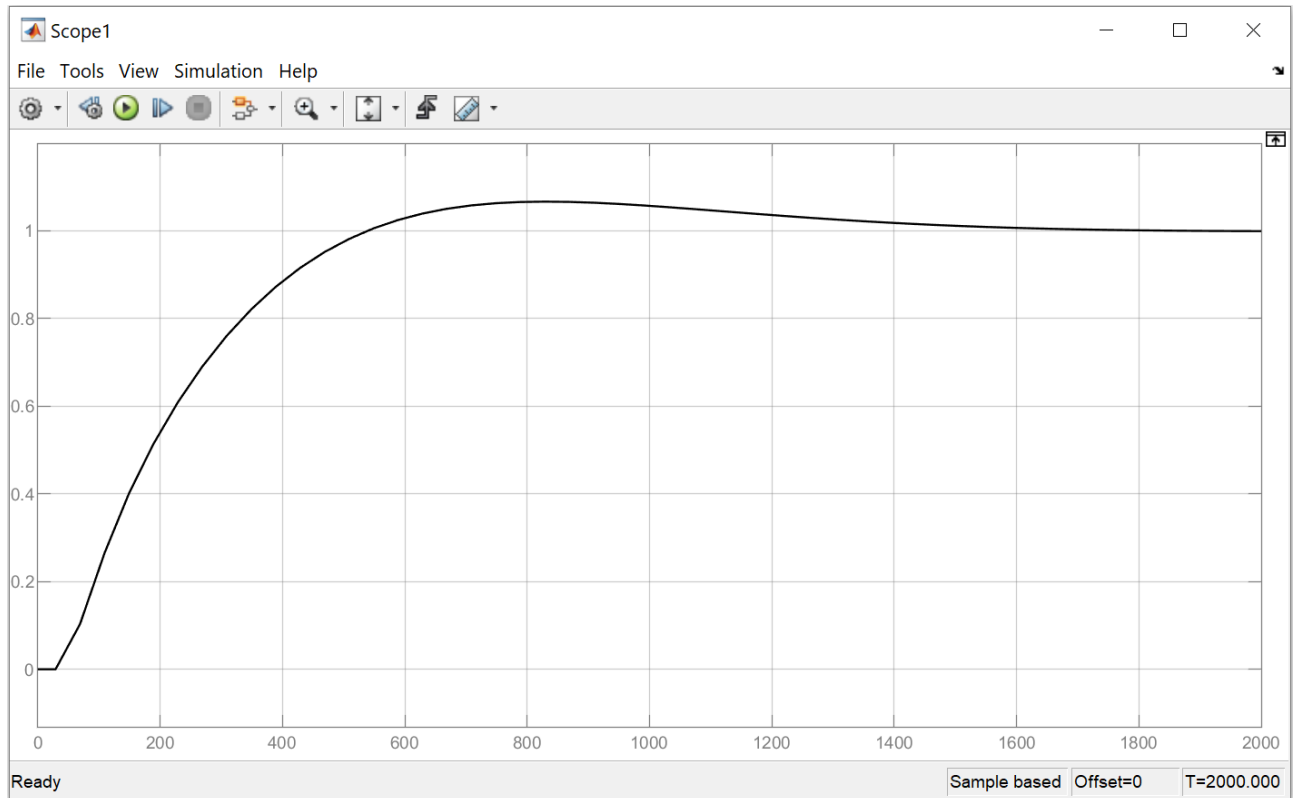


Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика АСР

Статична точність. Наявність інтегральної складової в ПІД-регуляторі забезпечує нульову статичну помилку для постійних збурень по завданню. Однак при дії постійних збурень по каналу навантаження статична помилка може становити:

$$e_{\text{ст}} = \frac{f_{\text{зб}}}{K_{\text{розім}}}$$

де  $f_{\text{зб}}$  - амплітуда збурення,  $K_{\text{розім}}$  - коефіцієнт передачі розімкнутої системи на нульовій частоті.

Частотні характеристики замкнутої системи дозволяють оцінити її здатність відтворювати сигнали різних частот та рівень придушення високочастотних збурень.

Смуга пропускання системи визначається частотою  $\omega_{\text{п}}$ , на якій модуль частотної характеристики замкнутої системи зменшується до рівня 0.707 (-3 дБ) від значення на нульовій частоті:  $|W_{\text{зам}}(j\omega_{\text{п}})| = 0.707$ .

Для нашої системи  $\omega_{\text{п}} \approx 0.025$  рад/с, що відповідає періоду близько 4

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

хвилин. Це означає, що система може якісно відстежувати повільні зміни завдання з періодом понад 10-15 хвилин.

Показник коливальності  $M$  характеризує максимальне значення модуля частотної характеристики замкнутої системи:

$$M = \max |W_{\text{зам}}(j\omega)|.$$

Для систем з хорошою якістю керування  $M$  не повинно перевищувати 1.3-1.5. За попередніми розрахунками  $M \approx 1.25$ , що вказує на прийнятну якість налаштування.

Чутливість до зміни запізнення. Зміна часу запізнення особливо критична для стійкості системи. Максимально допустиме збільшення запізнення можна оцінити з умови збереження запасу стійкості за фазою не менше  $20^\circ$ :

$$\Delta\tau_{\text{max}}^0 \approx \frac{20^\circ}{\omega_c \times 57.3^\circ} \approx 18 \text{ секунд.}$$

Тобто система залишиться стійкою при збільшенні запізнення до 63 секунд, що забезпечує достатній запас робастності.

### Висновки до розділу

У цьому розділі здійснено комплексний синтез автоматизованої системи керування температурним режимом ребойлера колони стабілізації нафти з використанням засобів MATLAB Simulink. Проведено детальний аналіз динамічних властивостей об'єкта керування на основі його передавальної функції, враховано теплову інерційність та транспортне запізнення. Застосовано методи Зіглера–Нічолса та симетричного оптимуму для розрахунку параметрів ПІД-регулятора. Розроблено структурну модель системи в Simulink, що включає елементи обмеження, запізнення та модулювання виконавчих пристроїв. Проаналізовано стійкість та якість перехідного процесу з використанням критерію Найквіста та частотних характеристик. Показано, що налаштована система забезпечує достатню стійкість і прийнятну якість керування, а також здатна до компенсації зовнішніх збурень та адаптації до змін технологічного середовища.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

## 4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АСУ ПРОЦЕСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАФТИ

### 4.1 Аналіз об'єкта керування та постановка задачі для розроблення проєктної документації

Об'єктом автоматизації виступає технологічна установка стабілізації нафти, яка забезпечує вилучення легких вуглеводнів та приведення товарної нафти до стану, придатного для подальшого зберігання, транспортування і переробки. Процес стабілізації здійснюється шляхом нагрівання сирової нафти до визначеної температури та подальшого її фракційного розділення в колоні, оснащій дефлегматором, ребойлером і системами теплообміну. Динаміка процесу визначається сукупністю взаємопов'язаних теплофізичних та гідродинамічних явищ, що відбуваються в умовах змінного навантаження, тиску та температури.

Стабільність та ефективність роботи установки значною мірою залежать від точності підтримання температурного режиму в нижній частині колони, що забезпечується за допомогою регулювання витрати теплоносія в ребойлері. Крім цього, важливе значення мають параметри тиску у верхній частині колони, рівня рідини в кубовій частині, а також температури в різних точках технологічного обладнання. Наявність зворотних зв'язків і взаємозалежних контурів керування зумовлює складність структури системи автоматизації та висуває підвищені вимоги до її точності, швидкодії та адаптивності.

Аналіз об'єкта керування передбачає ідентифікацію основних технологічних ланок та параметрів, які впливають на кінцеву якість стабілізованої нафти, а також виявлення зовнішніх і внутрішніх збурень, що можуть викликати порушення режиму. До таких збурень відносять зміни фізико-хімічного складу сировини, коливання температури теплоносія, зміни у гідравлічному опорі теплообмінників та інші чинники, які вимагають постійного коригування дій регуляторів.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

На основі здійсненого аналізу сформульовано технічну задачу автоматизації, яка полягає в розробці проєктної документації на створення багатоконтурної автоматизованої системи керування, що забезпечить стабільне підтримання заданих параметрів процесу, оперативну реакцію на зміну умов технологічного середовища та інтеграцію з системами диспетчерського контролю.

Проєктування цієї системи передбачає побудову функціональної, принципової та структурної схем автоматизації, вибір вимірювальних і виконавчих пристроїв, розробку програмного забезпечення для програмованого логічного контролера, а також створення операторського інтерфейсу для відображення технологічного стану об'єкта. Всі компоненти повинні бути адаптовані до умов роботи з агресивними середовищами, підвищеними температурами та вимогами до безперервного функціонування технологічної установки [7].

#### **4.2 Вибір давачів та первинних перетворювачів**

У процесі аналізу ринку технічних засобів для реалізації функції зворотного зв'язку в контурі керування температурою підшипників насосного обладнання було проведено порівняльну оцінку доступних моделей промислових температурних перетворювачів. На підставі техніко-економічного аналізу та порівняння характеристик обґрунтовано доцільність застосування польового перетворювача температури іTEMP TMT142 виробництва компанії Endress+Hauser замість альтернативної моделі TTF300. Вибір обумовлений перевагами TMT142 за шириною діапазону вимірювання температури, кількістю доступних типів вхідних сигналів, функціональною гнучкістю та меншою вартістю.

Перетворювач іTEMP TMT142 використовується в якості первинного елемента зворотного зв'язку у контурі регулювання температурного стану підшипникових вузлів насосів. Його функція полягає у прецизійному

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

вимірюванні температури з подальшою передачею уніфікованого аналогового сигналу 4–20 мА на мікропроцесорний регулятор або ПЛК (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Польовий перетворювач температури iTEMP TMT142

Конструктивно пристрій являє собою універсальний трансмітер, здатний працювати з різними типами датчиків: термометрами опору (Pt100, Pt1000), термопарами (типів J, K, N, S та ін.), а також пасивними перетворювачами опору (до 4 кОм) і сигналами напруги в мілівольтовому діапазоні. Завдяки підтримці протоколу HART® забезпечується двосторонній цифровий обмін між трансмітером та зовнішніми системами керування, що дозволяє здійснювати параметризацію, діагностику та моніторинг стану приладу в режимі реального часу.

Конфігурування та технічне обслуговування здійснюються за допомогою ПЗ FieldCare або ReadWin® 2000, інстальованого на ПК, або через портативний модуль керування DXR375. Цей функціонал значно спрощує адаптацію приладу до різних умов експлуатації без необхідності демонтажу.

TMT142 характеризується високою точністю, довготривалою стабільністю показів та розширеним температурним діапазоном, що дозволяє його використання як у стандартних, так і в екстремальних умовах. Для підвищення рівня безпеки передбачена опція виконання у герметичному корпусі з

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

нержавіючої сталі, що відповідає вимогам до експлуатації у вибухонебезпечних зонах відповідно до сертифікації АТЕХ/ІЕСЕх.

У процесі відбору засобів вимірювання тиску для реалізації контурів контролю в автоматизованій системі керування процесом стабілізації нафти було здійснено порівняльний аналіз двох моделей промислових сенсорів: Keller серії 23/25 та MBS 1700 фірми DANFOSS. Вибір було зроблено на користь перетворювача тиску Keller, з огляду на низку техніко-функціональних переваг, серед яких слід виокремити ширший діапазон вимірювань, вищу точність, покращені температурні характеристики, підвищену частоту опитування, а також суттєво нижчу вартість у порівнянні з конкурентом.

Обрана модель Keller серії 25 оснащена плоскою мембраною, що забезпечує не лише високу стабільність вимірювань при роботі з забрудненими або в'язкими середовищами, а й можливість легкого очищення чутливого елемента без демонтажу. Така конструкція є надзвичайно актуальною для застосування у нафтопереробній галузі, де існує ризик накопичення механічних частинок на поверхні чутливого елемента (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 - Давач тиску Keller серія 23/25

Датчик розроблений для роботи з абсолютним або відносним тиском у широкому діапазоні (до 600 бар залежно від модифікації), з високою роздільною здатністю та частотою дискретизації до 1000 Гц, що дозволяє фіксувати швидкі зміни тиску — особливо актуальні при виникненні гідравлічних ударів,

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

імпульсних навантажень або нестабільних режимів у технологічному трубопроводі. Робочий температурний діапазон розширено до +125 °С, що дозволяє експлуатувати прилад у зоні підвищених температур без додаткових термобар'єрів.

Механічне підключення здійснюється за стандартом G 1/2" або G 3/4", а плоска діафрагма забезпечує рівномірне передавання тиску на сенсор навіть за наявності домішок у середовищі. Всі сенсори проходять індивідуальне калібрування на заводі-виробнику з забезпеченням класу точності до 0,25% від повної шкали.

Особливістю серії 25 є підтримка сучасного цифрового протоколу зв'язку IO-Link, що забезпечує двосторонню інтеграцію сенсора у загальну архітектуру АСУ. Це дає змогу в реальному часі не лише передавати значення тиску на контролер, а й здійснювати діагностику сенсора, змінювати конфігурацію параметрів та вести журнал несправностей. Зчитування інформації відбувається на панелі оператора, що дозволяє здійснювати візуальний контроль за станом трубопроводів, резервуарів або фільтраційних секцій.

Високоточний перетворювач рівня 36 XW виробництва компанії Keller, призначений для безперервного вимірювання рівня рідин у резервуарах та силосах у промислових умовах. Датчик базується на п'єзорезистивній технології сенсора, що забезпечує високу точність та стабільність показів навіть за умов значних температурних коливань і механічних навантажень (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Високоточний перетворювач рівня 36 XW Keller

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Основні технічні характеристики пристрою:

- Діапазон вимірювань тиску: від 0...0,6 бар до 0...60 бар, залежно від модифікації;
- Тип вимірювання: абсолютний або відносний тиск (у тому числі рівень рідини через тиск стовпа);
- Точність вимірювання: клас точності не гірший за  $\pm 0,1\%$  від повної шкали;
- Аналого-цифровий перетворювач: 16-бітний з частотою дискретизації до 100 Гц (налаштовується);
- Вихідні сигнали: аналогові (4–20 мА, 0–10 В) та цифрові (RS485, протоколи конфігурації через Keller READ30/PROG30);
- Робочий температурний діапазон: від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (залежно від виконання корпусу);
- Матеріал корпусу: високоякісна нержавіюча сталь для захисту від корозії і агресивного середовища;
- Програмне забезпечення: можливість налаштування параметрів, калібрування та моніторингу через спеціалізовані інструменти Keller READ30 і PROG30 у поєднанні з RS485-конверторами (K102, K107);
- Особливості: математична компенсація похибок температури і неточностей сенсора завдяки вбудованим алгоритмам, що підвищує надійність і довговічність вимірювань.

Завдяки цим характеристикам перетворювач 36 XW Keller є оптимальним вибором для інтеграції в автоматизовані системи управління технологічними процесами, де потрібна висока точність, надійність та гнучкість у налаштуваннях при контролі рівня рідини.

Ротаметр KROHNE H250 M40R є високоточним вимірювальним приладом, призначеним для безперервного вимірювання витрат рідин і газів у промислових процесах. Завдяки своїй конструкції та матеріалам, він підходить для роботи в різноманітних середовищах, включаючи агресивні та корозійно активні

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

речовини.

Конструктивно пристрій являє собою вертикальну трубку зі спеціальним поплавком, що піднімається в потоці робочого середовища, і шкалою для візуального визначення обсягу проходження середовища. Матеріали корпусу та робочих елементів відповідають високим стандартам стійкості до корозії та механічних навантажень, що забезпечує тривалий термін експлуатації навіть в умовах складної промислової атмосфери (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Ротаметр KROHNE H250 M40R

Особливістю моделі H250 M40R є її здатність забезпечувати точність вимірювання в межах  $\pm 1\%$  від повної шкали, що робить її придатною для застосувань, де необхідний контроль з високою роздільною здатністю. Діапазон вимірювань охоплює широкий спектр значень витрат, що дозволяє використовувати ротаметр як у малих, так і у великих потоках.

Матеріал виготовлення поплавка і внутрішньої поверхні трубки передбачає варіанти з корозійностійких сплавів і спеціальним покриттям, що підвищує надійність при експлуатації з агресивними середовищами. Ротаметр оснащений різьбовим або фланцевим підключенням, що полегшує інтеграцію в існуючі трубопровідні системи.

Робочий тиск пристрою може досягати 25 бар, а температурний діапазон

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

становить від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відповідає вимогам більшості промислових технологій. Пристрій підтримує як прямі, так і непрямі методи відбору інформації, включно з підключенням зовнішніх датчиків для автоматичного збору даних.

Основні технічні характеристики:

- Діапазон вимірювань витрат: від 0,1 до 120 м<sup>3</sup>/год (залежно від типорозміру і середовища);
- Точність вимірювань:  $\pm 1\%$  від повної шкали;
- Робочий тиск: до 25 бар;
- Робочий температурний діапазон: від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Матеріали корпусу: нержавіюча сталь AISI 316L або інші корозійностійкі сплави;
- Матеріал поплавка: леговані сталі або з покриттям для підвищеної корозійної стійкості;
- Тип підключення: різьбове або фланцеве згідно з DIN або ANSI стандартами;
- Клас захисту: IP65 (залежить від виконання);
- Особливості конструкції: можливість оснащення додатковими датчиками положення поплавка для інтеграції з автоматичними системами збору даних;
- Області застосування: вимірювання витрат технічних газів, води, хімічних розчинів та інших технологічних середовищ із агресивними властивостями.

Ротаметр KROHNE H250 M40R поєднує у собі точність, довговічність і стійкість до агресивних умов експлуатації, що робить його оптимальним рішенням для автоматизованих систем контролю та регулювання технологічних процесів.

Регулюючий клапан двоходовий LDM RV113R: опис та технічні характеристики

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Двоходовий регулюючий клапан LDM RV113R призначений для точного модуляційного регулювання витрат робочих середовищ — рідин, газів або парових сумішей — у технологічних трубопроводах різного призначення. Він широко застосовується в автоматизованих системах керування промислових процесів, де потрібна висока точність підтримки заданих параметрів (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Регулюючий клапан двоходовий LDM RV113R

Конструктивно клапан виконаний із високоякісних корозійностійких матеріалів, що забезпечують довговічність і стійкість до агресивних середовищ. Основним робочим органом є сідло з ущільнювальним елементом і клапанний шток, що переміщується за допомогою виконавчого механізму.

Модель RV113R обладнана електроприводом, який забезпечує плавне й точне позиціонування клапана у діапазоні 0–100 % відкриття. Виконавчий механізм підтримує швидкість переміщення, що дозволяє мінімізувати коливання процесу та підвищити стабільність керування.

Основні технічні характеристики клапана LDM RV113R:

- Тип клапана: двоходовий (регулювальний);
- Умовний прохід (Dn): від 15 до 100 мм (залежно від модифікації);
- Робочий тиск: до 16 бар (стандартне виконання), можливе

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

виготовлення під підвищений тиск;

- Матеріал корпусу: чавун, сталь або нержавіюча сталь (залежно від умов експлуатації);
- Тип ущільнення: паронітове або PTFE ущільнення для забезпечення герметичності;
- Кут відкриття: 0–90 градусів;
- Привід: електричний (24 В або 230 В, залежно від замовлення) з керуванням по сигналу 4–20 мА або 0–10 В;
- Час відкриття/закриття: близько 5–15 секунд, залежно від розміру клапана та виконавчого механізму;
- Коефіцієнт  $K_v$ : варіюється від 0,5 до 50 м<sup>3</sup>/год (залежно від діаметру і конструкції клапана);
- Тип керування: аналогове модуляційне з можливістю інтеграції у систему автоматичного регулювання;
- Середовища застосування: вода, пара, нафтопродукти, технологічні гази;
- Клас герметичності: не нижче А, відповідно до стандартів IEC 60534;
- Температурний діапазон експлуатації: від –20 °С до +180 °С (залежно від матеріалу ущільнень).

Регулюючий клапан LDM RV113R забезпечує високу точність підтримання заданих технологічних параметрів, що суттєво підвищує ефективність і безпеку виробничих процесів. Його конструкція дозволяє експлуатувати пристрій у складних умовах із мінімальними втратами робочої середовища та з високим ресурсом роботи.

PID-регулятор REX-C100 — це компактний мікропроцесорний пристрій, призначений для автоматичного регулювання технологічних параметрів, таких як температура, тиск, рівень або витрата, у промислових системах керування. Завдяки універсальності, надійності та зручності налаштувань він широко застосовується в автоматизованих системах регулювання невеликих і середніх

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

виробничих процесів (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – PID-регулятора REX-C100

Пристрій підтримує класичний алгоритм PID-регулювання, що дозволяє ефективно контролювати об'єкт керування за трьома складовими: пропорційною, інтегральною та диференціальною. Це забезпечує швидке реагування на відхилення від заданого значення та мінімізацію перерегулювань.

Основні технічні характеристики PID-регулятора REX-C100:

- Тип регулятора: цифровий PID-регулятор на основі мікропроцесора;
- Кількість входів: 1 аналоговий вхід для підключення датчиків типу термопара (типи K, J, T, E, R, S, B, N), терморезисторів (Pt100, Cu50), або стандартних сигналів (0-10 В, 4-20 мА);
  - Кількість виходів: 2 виходи (релейний та аналоговий);
  - Релейний вихід: керування виконавчими пристроями (клапани, контактори) з номінальною навантаженням до 3 А при 250 В змінного струму;
  - Аналоговий вихід: 0-10 В або 4-20 мА для безперервного керування;
  - Живлення: 85–265 В змінного струму (50/60 Гц) або 12–24 В постійного струму (залежно від модифікації);
  - Діапазон вимірювань температури: від –200 °С до +1800 °С (залежно від типу датчика);
  - Точність вимірювання:  $\pm 0,3$  % від повного діапазону;

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

- Програмовані параметри: налаштування коефіцієнтів PID (пропорційного, інтегрального, диференціального), гібернації, гістерезису, обмеження виходу;
- Режими роботи: ручний, автоматичний, програмований;
- Інтерфейс налаштування: передня панель із кнопками та цифровим LED-дисплеєм для зручного введення параметрів;
- Додаткові функції: автоматичне налаштування PID (Auto-Tuning), захист від перегріву, індикація стану виходу, сигналізація аварійних режимів;
- Габарити: стандартний модульний корпус для монтажу в панель розміром 48×48 мм;
- Клас захисту: IP20 (передня панель).

PID-регулятор REX-C100 вирізняється універсальністю та простотою інтеграції у різноманітні системи автоматизації, дозволяючи здійснювати надійний та точний контроль технологічних параметрів із мінімальними витратами на налаштування та обслуговування. Його застосування сприяє підвищенню стабільності виробничих процесів, зниженню втрат ресурсів та поліпшенню якості кінцевої продукції.

#### 4.3 Проектна документація

Проектування функціональної схеми автоматизації починається з аналізу технологічного процесу, визначення ключових параметрів, що підлягають контролю, та побудови логіки їх взаємодії. Функціональна схема є графічним відображенням структури системи, у якій показано взаємозв'язок між датчиками, виконавчими механізмами, регуляторами, контролерами та операторами. Вона демонструє, як інформація від датчиків надходить на вхід керуючих пристроїв, яким чином здійснюється аналіз і прийняття рішень, а також які команди передаються виконавчим механізмам для підтримання заданих параметрів. При цьому велике значення має визначення контурів автоматичного регулювання, умов переходу між режимами роботи, а також

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

реалізація захисних алгоритмів. Ретельно розроблена функціональна схема дозволяє мінімізувати ймовірність помилок у логіці керування та забезпечити гнучкість системи для подальших змін і модернізації.

Схема електричних з'єднань, деталізує принципову електричну структуру системи, включаючи типи та характеристики кабелів, розподільчих пристроїв, електричних ланцюгів живлення та керування, захисних елементів та з'єднувальних компонентів. Цей етап містить електричні принципові схеми, що відображають послідовність і способи з'єднання всіх електротехнічних елементів, а також монтажні схеми, які враховують фізичне розташування і прокладку кабелів у будівлі або на виробничій площадці. Під час розробки таких схем потрібно суворо дотримуватися норм електробезпеки, стандартів (наприклад, ГОСТ, ІЕС), а також вимог до заземлення, захисту від перенапруг, електромагнітних перешкод та інших факторів, що впливають на стабільність і безпеку системи. Важливо також передбачити зручність монтажу, технічного обслуговування та ремонту, забезпечити маркування всіх кабелів і точок підключення.

Схема шафи автоматики є комплексним кресленням, що відображає фізичне розташування всіх електричних і електронних компонентів усередині шафи керування. Вона включає позиціонування контролерів, регуляторів, силових модулів, блоків живлення, реле, запобіжників, клемників, вимикачів, індикаторів та інших пристроїв, а також елементи системи охолодження або вентиляції. Коректне проектування шафи автоматики гарантує оптимальне використання простору, ефективне охолодження обладнання, мінімізацію перешкод і забезпечення легкого доступу для обслуговування. Крім того, до схем шафи входить опис розводки електричних з'єднань між компонентами, а також технічні вимоги до монтажу, що підвищують надійність і зручність експлуатації системи в цілому.

Загалом, розробка цих трьох складових проектної документації — функціональної схеми автоматизації, схеми електричних з'єднань та схеми шафи

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

автоматики — становить основу для створення збалансованої, ефективної та безпечної системи автоматичного керування. Вона забезпечує не лише оптимальну організацію роботи процесу, а й дозволяє значно спростити монтаж, пусконаладжувальні роботи та подальше технічне обслуговування, а також адаптацію системи до майбутніх технічних змін.

### **Висновки до розділу**

В даному розділі було проведено комплексний аналіз та розроблення проектних рішень для автоматизованої системи управління процесом стабілізації нафти. Здійснено вибір і обґрунтування технічних засобів автоматизації, серед яких мікропроцесорні регулятори, високоточні давачі температури, тиску та рівня, а також виконавчі механізми, з урахуванням їх технічних характеристик, надійності та економічної ефективності. Розглянуто особливості конструкцій і принципи роботи вибраного обладнання, що дозволяє забезпечити точність і стабільність регулювання технологічних параметрів.

Окрім цього, у розділі висвітлено процес проектування функціональної схеми автоматизації, що відображає логічні взаємозв'язки між складовими системи, а також розробку схем електричних з'єднань і шафи автоматики, які гарантують правильність монтажу, безпеку експлуатації та зручність технічного обслуговування. Це дозволяє сформуванню єдиної інтегрованої системи.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було здійснено розробку проектних рішень автоматизованої системи керування процесом стабілізації нафти, з акцентом на впровадження сучасних мікропроцесорних засобів вимірювання та регулювання технологічних параметрів.

В першому розділі було розглянуто фізико-хімічні основи, технологічну сутність та структурну організацію процесу стабілізації нафти, що реалізується на спеціалізованих промислових установках із використанням принципів ректифікаційного поділу. Детально проаналізовано функціонування основних апаратів - ректифікаційних колон, теплообмінників, печей та сепараторів - у межах автоматизованої системи керування, що забезпечує стабільність параметрів технологічного процесу. Показано, що головною метою стабілізації є вилучення легких вуглеводнів (C1–C4), які залишаються в нафті після промислової сепарації. Процес ґрунтується на багатократному фазовому переході легколетких компонентів під дією температури та тиску з подальшою конденсацією й сепарацією. На підставі аналізу функціональної схеми було обґрунтовано ефективність теплоенергетичних рішень, реалізованих у контурі циркуляції стабільної нафти та газового бензину. Сформовано уявлення про хімізм процесу, що відображає комплекс фізико-хімічних механізмів, пов'язаних із десорбцією, випаровуванням і конденсацією вуглеводневих компонентів. Особливу увагу приділено ролі автоматизованої системи керування, яка забезпечує стабільність температурних, тискових і рівневих параметрів, дозволяючи підтримувати оптимальні умови для фракціонування нафти та мінімізувати втрати цінних ресурсів.

В другому розділі проведено розробку математичної моделі та аналіз динамічних характеристик контуру автоматичного регулювання температури ребойлера колони стабілізації нафти для промислової установки продуктивністю 2000 м<sup>3</sup>/добу. Обґрунтовано вибір контуру регулювання температури в ребойлері

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

як критично важливого для забезпечення якості продукції, енергетичної ефективності та безпечності технологічного процесу стабілізації нафти. На основі рівняння теплового балансу розроблено математичну модель об'єкта керування з реальними промисловими параметрами: об'ємом  $V = 15 \text{ м}^3$ , теплоємністю системи  $C = 24,57 \text{ МДж/К}$  та коефіцієнтом теплопередачі  $K_T = 54 \text{ кВт/К}$ . Проведено лінеаризацію моделі навколо робочої точки при температурі  $180^\circ\text{C}$ . Розраховано динамічні характеристики об'єкта: постійну часу  $\tau = 435 \text{ с}$ , коефіцієнт передачі  $K_{об} = 14,16 \text{ К}$  та транспортне запізнення  $\tau_d = 45 \text{ с}$ . Отримано передавальну функцію об'єкта у вигляді  $W_{об(s)} = 14,16 \times \frac{e^{-45s}}{435s + 1}$ .

У третьому розділі здійснено комплексний синтез автоматизованої системи керування температурним режимом ребойлера колони стабілізації нафти з використанням засобів MATLAB Simulink. Проведено детальний аналіз динамічних властивостей об'єкта керування на основі його передавальної функції, враховано теплову інерційність та транспортне запізнення. Застосовано методи Зіглера–Нічолса та симетричного оптимуму для розрахунку параметрів ПІД-регулятора. Розроблено структурну модель системи в Simulink, що включає елементи обмеження, запізнення та модулювання виконавчих пристроїв. Проаналізовано стійкість та якість перехідного процесу з використанням критерію Найквіста та частотних характеристик. Показано, що налаштована система забезпечує достатню стійкість і прийнятну якість керування, а також здатна до компенсації зовнішніх збурень та адаптації до змін технологічного середовища.

В четвертому розділі було проведено комплексний аналіз та розроблення проектних рішень для автоматизованої системи управління процесом стабілізації нафти. Здійснено вибір і обґрунтування технічних засобів автоматизації, серед яких мікропроцесорні регулятори, високоточні давачі температури, тиску та рівня, а також виконавчі механізми, з урахуванням їх технічних характеристик, надійності та економічної ефективності. Розглянуто особливості конструкцій і принципи роботи вибраного обладнання, що дозволяє забезпечити точність і

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

стабільність регулювання технологічних параметрів. Окрім цього, у розділі висвітлено процес проектування функціональної схеми автоматизації, що відображає логічні взаємозв'язки між складовими системи, а також розробку схем електричних з'єднань і шафи автоматики, які гарантують правильність монтажу, безпеку експлуатації та зручність технічного обслуговування. Це дозволяє сформувати єдину інтегровану систему.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Паламарчук В.І., Шведова Г.Ю. Технологія нафти та газу: навч. посіб. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 320 с.
2. Кобрин М.І., Колтун Ю.В. Технологія переробки нафти і газу. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 296 с.
3. Дмитрів І.Г., Цимбалюк О.В. Основи автоматизації технологічних процесів у нафтогазовій промисловості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. – 184 с.
4. Левченко А.І., Тимошенко Л.Ф. Автоматизація технологічних процесів у нафтопереробній промисловості. – Суми: СумДУ, 2019. – 210 с.
5. Білецький В.С. Технологія нафти і газу: підручник. – Донецьк: ДонНТУ, 2020. – 352 с.
6. Кузьменко В.О., Павленко А.П. Автоматизація хімічних виробництв: навчальний посібник. – Київ: КНУТД, 2021. – 274 с.
7. Сердюк М.О., Тищенко С.В. Системи автоматизованого управління технологічними процесами. – Київ: НТУУ, 2022. – 288 с.

					ДП. АКП-42.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

